T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

ATIK ISI-ELEKTRİK ENERJİSİ DÖNÜŞÜMÜ SAĞLAYAN FARKLI TİP TERMOELEKTRİK SİSTEMLERİN DENEYSEL VE TEORİK ANALİZİ

Aminu YUSUF

DANIŞMAN
Prof. Dr. Sedat BALLIKAYA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Haziran, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Amınu YUSUF tarafından, **Prof. Dr. Sedat BALLIKAYA** danışmanlığında hazırlanan **" ATIK ISI-ELEKTRİK ENERJİSİ DÖNÜŞÜMÜ SAĞLAYAN FARKLI TİP TERMOELEKTRİK SİSTEMLERİN DENEYSEL VE TEORİK ANALİZİ "** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **10/06/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi		İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. Sedat BALLIKAYA İstanbul Universitesi- Cerrahpaşa Mühendislik Bilimleri Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Hakan DEMİR Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühensdisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Cihat BOYRAZ Marmara Üniversitesi Makine Mühensdisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Koray GÜRKAN İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Hasan TİRYAKİ Istanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Aminu YUSUF

(İmza)

Annem'e ithaf ediyorum

BÜTÇE DESTEKLERİ

ATIK ISI-ELEKTRİK ENERJİSİ DÖNÜŞÜMÜ SAĞLAYAN FARKLI TİP TERMOELEKTRİK SİSTEMLERİN DENEYSEL VE TEORİK ANALİZİ

Bu tez çalışması, TÜBİTAK 216M254 no'lu projesi ile desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora danışmanım Prof. Dr. Sedat BALLIKAYA'ya bana verdiği tüm akademik, ahlaki ve maddi destek için teşekkür ediyorum. Ayrıca Federal Üniversitesi Dutsın-ma yönetimine doktora programına devam etmeme izin verdiklerinden dolayı teşekkür etmek istiyorum. Doktora programım sırasında şu veya bu şekilde bana yardımcı olan herkesi takdir ediyorum. Son olarak, yakın aile üyelerime yani Ayşe, Mehmet ve Asmau'ya her zaman aklımdasınız ve size çok şey borçluyum.

Haziran 2022 **Aminu YUSUF**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

1. GİRİŞ 1
1.1. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ 3
1.2. AMAÇ VE HEDEFLER 4
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE 5
2.1. TERMOELEKTRİK OLAY 5
2.2. SEEBECK ETKİSİ 5
2.3. PELTIER ETKİSİ 7
2.4. THOMSON ETKİSİ 7
2.5. JOULE ISISI ETKİSİ 8
2.6. FOURIER ISISI 8
2.7. DEĞERLİK KATSAYISI 8
2.8. TERMOELEKTRİK MALZEMELER 10
2.9. TERMOELEKTRİK JENERATÖRÜNÜN PERFORMANSINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER 11
2.9.1. Konveksiyon ve Radyasyon Kayıpları 11
2.9.2. Elektriksel ve Termal Temas Dirençler Nedeniyle Kayıplar 12
2.9.3. Thomson Etkisi Nedeniyle Kayıplar 13
2.10. ATIK ISI-ELEKTRİK ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ KAPSAMINDA FARKLI TERMOELEKTRİK SİSTEMLER ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR 14
2.10.1. Katmanlı Modül Tasarım Ve Performans Analizi 14
2.10.2. Thomson Etkisi ve Temas Direncinin Modül Performansı Üzerine Etkisinin Analiz Edilmesi 15
2.10.3. Konsentre Fotovoltaik-Termoelektrik Modül Hibrit Enerji Üretecinin Çoklu Genetik Algoritma Yöntemi ile Performans Analizi 19
2.10.4. Maksimum Güç Çıkışı için Konsantre Fotovoltaik-Termoelekrik Hibrit Sistemlerde Termal Direnç Analizi 23
2.10.5. Esnek Ve Rijit Termoelektrik Modüllerde Doldurma Malzemesinin Modül Performansı Üzerine Etkisinin Deneysel ve Teorik Analizi 26
2.10.6. Düşük Maliyetli Modül Üretimi Mekanik, Maliyet ve Performans Analizi 29

2.11. TERMOELEKTRİK MODÜLLERİN UYGULAMALARI 32
3. YÖNTEM 33
3.1. MALZEME SENTEZI 33
3.2. MALZEME KARAKTERİZASYONU 34
3.3. TEORİK ANALİZ 36
3.3.1. Analizlerde Kullanılan Temel Denklemler 38
3.3.2. Sınır Koşulları 42
4. BULGULAR 43
4.1. DÜŞÜK MALİYETLİ MODÜL ÜRETİM MEKANİK, MALİYET VE PERFORMANSININ ÖLÇÜM VE KARAKTERİZASYON 43
4.1.1. Toz X-ışını Kırınımı ve Tarama Elektron Mikroskobu Analizleri 43
4.1.2. Termoelektrik Malzemelerin Tranport Ölçümleri 45
4.1.3. Termoelektrik Modüllerin Modellenmesi ve Optimizasyonu 49
4.1.4. Teorik Modellerin Deneysel Doğrulaması 66
4.2. KATMANLI TERMOELEKTRİK MODÜLÜN COMSOL MULTIPHYSICS ÜZERİNDE PERFORMANS SONUÇLARI 70
4.3. THOMSON ETKİSİ VE TEMAS DİRENCİNİN TERMOELEKTRİK MODÜLÜN PERFORMANSINA ETKİSİNİN SONUÇLARI 73
4.4. KONSENTRE FOTOVOLTAİK-TERMOELEKTRİK MODÜL HİBRİT ENERJİ ÜRETECİNİN ÇOKLU GENETİK ALGORİTMA YÖNTEMİ İLE PERFORMANS SONUÇLARI 77
4.5. GÜÇ ÇIKIŞI İÇİN KONSANTRE FOTOVOLTAİK-TERMOELEKRİK HİBRİT SİSTEMLERDE TERMAL DİRENÇ SONUÇLARI 81
4.6. ESNEK VE RİJİT TERMOELEKTRİK MODÜLLERDE DOLDURMA MALZEMESİNİN MODÜL PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE TEORİK SONUÇLARI 85
5. TARTIŞMA 87
5.1. DÜŞÜK MALİYETLİ MODÜL ÜRETİMİ İLE, MEKANİK, MALİYET, VE PERFORMANS ÖLÇÜMLERİ ÜZERİNE TARTIŞMALAR 87
5.1.1. Termoelektrik Malzemelerin Karakterizasyonu 87
5.1.2. Termoelektrik Modüllerin Teorik Analizi 88
5.1.3. Termoelektrik Modüllerin Deneysel Analizi 89
5.2. KATMANLI MODÜL TASARIM VE PERFORMANS ANALİZİ ÜZERİNE TARTIŞMALAR 89
5.3. THOMSON ETKİSİ VE TEMAS DİRENCİNİN TERMOELEKTRİK MODÜLÜN PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİ İLE İLGİLİ TARTIŞMALAR 90

5.4. KONSENTRE FOTOVOLTAİK-TERMOELEKTRİK MODÜL HİBRİT ENERJİ ÜRETECİNİN ÇOKLU GENETİK ALGORİTMA YÖNTEMİ İLE PERFORMANSININ ANALİZİ ÜZERİNE TARTIŞMALAR 90
5.5. GÜÇ ÇIKIŞI İÇİN KONSANTRE FOTOVOLTAİK-TERMOELEKRİK HİBRİT SİSTEMLERDE TERMAL DİRENÇ ÜZERİNE TARTIŞMALAR 91
5.6. ESNEK VE RİJİT TERMOELEKTRİK MODÜLLERDE DOLDURMA MALZEMESİNİN MODÜL PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE TEORİK SONUÇLARI ÜZERİNE TARTIŞMALAR 92
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 94
KAYNAKLAR 97
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 108
ETİK KURUL İZİN YAZISI 109
KURUM İZNİ YAZILARI 110
ÖZGEÇMİŞ 111

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Tek çiftten oluşan bir termoelektrik jeneratör yapısı. 6

Şekil 2.2: Tek çift termoelektrik soğutucu. 7

Şekil 2.3: Katmanlı termoelektrik modül (Yusf ve Ballikaya, 2020). 14

Şekil 2.4: Optimize edilen TE modül (Yusuf ve ark., 2021a). 19

Şekil 2.5: Kullanılan Genetik Algoritma yapısı (Yusuf ve ark., 2021a). 19

Şekil 2.6: Konsentre Fotovoltaik-Termoelektrik hibrit sistemi (Yusuf ve ark., 2021b). 21

Şekil 2.7: Farklı KFV-TE konfigurasyon (Yusuf ve Ballikaya, 2021). 26

Şekil 2.8: Rijit ve esnek TEJ tek çift gösterildi (Yusuf ve ark., 2021c). 29

Şekil 2. 9: a) Öğelerin kısmen milyon başına kullanılabilirliği, (b) Normalleştirilmiş tellurium maliyeti, (c) Elementlerin LD50 ve GHS değerleri. .....31Şekil 3. 1: a) Eldiven kabin, b) MSE Fırını. 33

Şekil 3.2: a) Bilye frezeleme, b) Soğuk pres makinesi. 34

Şekil 3. 3: a) Lazer flaş analizörü (LFA1000), b) ZEM-3 Seebeck katsayısı ve elektrik direnci ölçümü. 35

Şekil 3.4: Rigaku Ultima X-ışını difaraktometresi. 36

Şekil 3.5: İki çiftli TEJ. 37

Şekil 4.1: Toz X-ışını kırınım desenleri: a) Kristal fazları $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$'e indeksleri (PDF#50-0954), b) Kristal fazları $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$'e indeksleri (PDF#49-1713). 44

Şekil 4.2: SEM grafikleri:a) 2µm'de Cu_2Se, b) 1µm'de Cu_2Se, c) 2µm'de Ag_2Se, d) 1µm'de Ag_2Se. 45

Şekil 4.3: $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$'ün taşınım özellikleri: a) elektrik iletkenliği, b) Seebeck katsayısı, c) termal iletkenlik, d) boyutsuz değerlik katsayısı. 46

Şekil 4.4: Bi2Te2'nin taşınım özellikleri. 7Se0.3: a) elektrik iletkenliği, b) Seebeck katsayısı, c) Termal iletkenlik, d) boyutsuz değerlik katsayısı. 47

Şekil 4.5: Cu_2Se'nin taşınım özellikleri: a) elektrik iletkenliği, b) Seebeck katsayısı, c) Termal iletkenlik, d) boyutsuz değerlik katsayısı. 48

Şekil 4.6: Ag_2Se'nin taşınım özellikleri: a) elektrik iletkenliği, b) Seebeck katsayısı, c) Termal iletkenlik, d) boyutsuz değerlik katsayısı. 49

Şekil 4.7: Farklı ağ (mesh) yoğunlukları: a) 1998841 eleman sayısı, b) 699381 eleman sayısı, c) 233423 eleman sayısı. 50

Şekil 4.8: Bacağın farklı alanına sahip TE modülünde sıcaklık dağılımı: a) 0,25 mm^2, b) 1 mm^2, c) 2,25 mm^2. 51

Şekil 4.9: Ayak alanının değişimi ile durum 1 için TE modülünün performansı a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi. 53

Şekil 4.10: Ayak alanının değişimi ile durum 2 için TE modülün performansı a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi. 54

Şekil 4.11: Ayak alanının değişimi ile durum 3 için TE modülün performansı a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi. 56

Şekil 4.12: Farklı bacak uzunluklarına sahip TE modülde sıcaklık dağılımı: a) 0,5 mm, b) 1 mm, c) 2 mm, d) 3 mm. 57

Şekil 4.13: Bacak uzunluğunun değişimi ile durum 1 için TE modülün performansı a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi. 58

Şekil 4.14: Bacak uzunluğu varyasyonu ile durum 2 için TE modülün performansı: a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi. 60

Şekil 4.15: Bacak uzunluğu varyasyonu ile durum 3 için TE modülün performansı: a) çıkış gücü, b) enerji dönüşümü verimliliği, c) von Mises gerilimi. 61

Şekil 4.16: von Mises gerilme 500 K sıcaklık gradyan elde edilir. 62

Şekil 4.17: von Mises gerilmenin 500 K sıcaklık gradyanında elde edilen TE modülünde konsantrasyonu. 63

Şekil 4.18: Düzgün ve düzgün olmayan ısı akışına sahip durum 1 için TE modülün performansı: a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi. 64

Şekil 4.19: Düzgün ve düzgün olmayan ısı akışı ile durum 2 için TE modülün performansı: a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi. 65

Şekil 4.20: Düzgün ve düzgün olmayan ısı akışı ile durum 3 için TE modülün performansı: a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi. 66

Şekil 4.21: TE modüllerinin imalatı : a) thermoelektrik bacaklar, b) bacak uzunluğu ölçülmekte, c) Üretim sırasında TE modül, d) üç farklı TE modülü. 67

Şekil 4.22: TE modüllerin performans karşılaştırması: a) Çıkış gücü, b) enerji verimliliği. 69

Şekil 4.23: Katmanlı ve katmansız TE modüllerinin enerji verimliliği. 71

Şekil 4.24 : TE modülün akım ve voltaj değişimi. 72

Şekil 4.25: TE modülün çıkış gücü ile yük direnci değişimi. 72

Şekil 4.26: TE modülün çıkış gücü ile gerilim değişimi. 73

Şekil 4.27: Optimum bacak uzunluğu. 74

Şekil 4.28: Optimum bacak alanı. 75

Şekil 4.29: Temas direnci dahil TE modülün çıkış gücü ve enerji verimliliği. 76

Şekil 4.30: Thomson etkisi dahil TE modülün çıkış gücü ve enerji verimliliği. 77

Şekil 4.31: Hibrit sistemlerin çıkış gücü ile güneş radyasyon değişim. 79

Şekil 4.32: Hibrit sistemlerin enerji verimliliği ile güneş radyasyon değişim. 79

Şekil 4.33: Hibrit sistemlerin çıkış gücü ile rüzgar hızı değişim. 80

Şekil 4.34: Hibrit sistemlerin enerji verimliliği ile rüzgar hızı değişim. 81

Şekil 4.35: Durum 1 ve 3 hibrit sistemlerin çıkış gücü ile geometrik kosentrasyon oranı değişim. 82

Şekil 4.36: Durum 2 ve 4 hibrit sistemlerin çıkış gücü ile geometrik kosentrasyon oranı değişim. 83

Şekil 4.37: Durum 1 ve 3 hibrit sistemlerin enerji verimliliği ile geometrik kosentrasyon oranı değişim. 84

Şekil 4.38: Durum 2 ve 4 hibrit sistemlerin enerji verimliliği ile geometrik kosentrasyon oranı değişim. 84

Şekil 4.39: Çıkış gücü: düz ısı kaynağı: a) r-TEJ, b) E-TEJ; kavisli ısı kaynağı: c) r-TEJ, d) E-TEJ. 86

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Termoelektrik bacaklarda kullanılan malzemelerin oranı.....37

Tablo 3.2: Termolektrik modülün boyutu. 38

Tablo 3.3: Malzemelerin özellikleri. 38

Tablo 4.1: Termoelektrik modül için ağ bağımsız test. 50

Tablo 4.2: TE modülün optimize edılen sonuçları. 74

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Akış alanı (m^2)
An	: N tipi bacağın kesit alanı (m^2)
Ap	: P tipi bacağın kesit alanı (m^2)
C_p	: Spesifik ısı kapasitesi J/(Kg K)
D	: Termal difüzyon (m^2/s)
d	: Dağınık düzlemler arasındaki mesafe (m)
E	: Young modülü (GPa)
e	: Elektrik yükü (C)
E	: Elektrik alan yoğunluğu vektörü (V/m)
I	: Termoelektrik modülün akımı (A)
I_{max}	: Termoelektrik modülün maksimum akımı (A)
I_{opt}	: Termoelektrik modülün optimum akımı (A)
J	: Akım yoğunluğu (A/m^2)
J_h	: Joule ısısı (W)
KL	: Kafes ısı iletkenliği W/(m K)
Kl	: Paralel termal iletkenlik W/(m K)
Ke	: Elektronik ısı iletkenliği W/(m K)
Kn	: N tipi termoelektrik bacak W/(m K)
Kp	: P tipi termoelektrik modülün ısı iletkenliği W/(m K)
K_{TE}	: Termoelektrik modülünün termal iletkenliği W/(m K)
L	: Termoelektrik bacak uzunluğu (m)
Ln	: Lorentz sayısı
N	: Termoelektrik çiftlerin sayısı
n	: İlk set termoelektrik çiftlerin sayısı
n_c	: Şarj taşıyıcısının konsantrasyonu (m^3)
n_i	: Tamsayı
m	: Termoelektrik çiftlerin ikinci grubunun sayısı
P_o	: Çıkış gücü (W)
P_{max}	: Maksimum çikiş gücü (W)

Q	: Isı kaynağı (W)
q	: Isıtma/soğutma (W)
Q_F	: Fourier ısısı (W)
Q_c	: Isı reddedildi (W)
Q_h	: Isı emilir (W)
R_{con}	: Temas direnci (Ω)
R_H	: Salon katsayısı (m^3/C)
Ri/R_{TE}	: Modülün iç direnci (Ω)
R_L	: Modülün yük direnci (Ω)
S	: Toplam Seebeck katsayısı (μV/K)
S_c	: Soğuk taraf Seebeck katsayısı (μV/K)
S_h	: Sıcak yan Seebeck katsayısı (μV/K)
S_n	: n tipi malzeme Seebeck katsayısı (μV/K)
S_p	: p tipi malzeme Seebeck katsayısı (μV/K)
S'	: Seebeck katsayısının türevi
T	: Sıcaklık (K)
Tc	: Soğuk yan Sıcaklık (K)
T_h	: Sıcak yan Sıcaklık (K)
σ	: elektrik iletkenliği (S/m)
σ_v	: von Mises gerilme (MPa)
λ	: Işın dalga boyu (m)
ρ	: Elektriksel direnç (Ω m)
ρ_d	: Malzeme yoğunluğu (Kg/m^3)
δ	: Thomson katsayısı (μV/K)
τ_n	: n tipi malzeme Thomson katsayısı (μV/K)
τ_p	: p tipi malzeme Thomson katsayısı (μV/K)
ΔT	: Sıcaklık gradyanı (K)
μ	: Poisson oranı
μ_c	: Taşıyıcı hareketliliği
η	: Enerji verimliliği (%)
η_{opt}	: Optimum enerji verimliliği (%)
φ	: Geliş açısı

Kısaltmalar	Açıklama
CTE	: Termal genleşme katsayısı
GHS	: Küresel uyumlu sistem
LD50	: Ortalama ölümcül doz
PPM	: Milyonda bir parça
TXIK	: Toz X-ışını kırınımı
TEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SPS	: Kıvılcım plazma sinterleme
Te	: Telluryum
TE	: Termoelektrik
TEJ	: Termoelektrik jeneratör
zT	: Termoelektrik malzemenin değerlik katsayısı
ZT	: Termoelektrik modülün değerlik katsayısı

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ATIK ISI-ELEKTRİK ENERJİSİ DÖNÜŞÜMÜ SAĞLAYAN FARKLI TİP TERMOELEKTRİK SİSTEMLERİN DENEYSEL VE TEORİK ANALİZİ

Aminu YUSUF

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. Sedat BALLIKAYA

Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak enerji tüketimi her geçen gün artmaktadır. Veriler dünya üzerinde tüketilen enerjinin 2026 yılında 720 katrilyon BTU değerine ulaşağını göstermektedir. Bugün kullanılan enerjinin büyük bir bölümü fosil bazlı yakıt ürünlerinden (petrol, doğal gaz kömür vs) karşılanmaktadır. Ancak bu yakıt kaynaklarının çıkarılması ve işlenmesinin maliyetli olması, çevre ve doğaya verdiği zararların yanı sıra sürdürülebilir olmamaları nedeniyle, yakın gelecekte kullanımları önemli oranda sınırlı olacaktır. Bu nedenle giderek artan enerji tüketimini karşılayacak, çevreci sürdürülebilir enerji kaynaklarının bulunması kaçınılmazdır. Son çalışmalar, Termoelektrik (TE) malzeme bazlı jeneratörlerin (TEJ), çevreci sürdülebilir enerji kaynakları olarak enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli rol oynayabileceğini göstermiştir. TEJ' leri enerji üretiminde önemli kılan husus onların atık ısıyı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilme kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Şöyle ki dünya da kullanılan enerjinin yaklaşık %70 i hiç bir dönüşüme tabi tutulmadan atık ısı olarak doğrudan atmosfere karışmaktadır. TEJ'ler ile bu enerjinin bir kısmı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilir. TEJ' lerin mevcut sürdürülebilir enerji kaynaklarına göre (güneş panelleri, rüzgar gülleri vb) ,bakım gerektirmeme, kurulum maliyetleri ve işletme maliyetlerinin düşük olması, mekanik bir hareket barındırmadığı için binlerce saat aralıksız ve sessiz çalışabilmeleri, enerji üretiminde mevsimsel ve coğraik koşullara bağlı olmamaları, ölçeklenebilir olmaları gibi üstünlükleri

bulunmaktadır. Ancak bu önemli üstünlüklerine karşı TEJ' lerin yaygın olarak kullanılmasının önünde halen mevcut bazı kısıtlamalar bulunmaktadır. Bunların başında verimliliklerinin henüz istenen seviyede olmaması gelmektedir. TEJ lerin yapısı elektriksel olarak seri ya da parelel bağlı belli sayıda TE modüllerden oluşur. TE modüller ise içerisinde elektriksel olarak seri ısısal olarak parelel bağlı belirli sayıda n tipi ve p tipi TE bacaktan oluşur. Bir TE modül aynı zamanda küçük bir TEJ olarak da değerlendirilebilir. Bir TEJ in verimliliğini belirleyen parametreler arasında modül yapısında kullanılan TE bacakların verimliliği, bağlantı elemanları ve lehimlerin elektriksel ve termal dirençleri gibi parametreleri saymak mümkündür. Bunların dışında TE modül yapısında kullanılan TE bacakların bazılarının toksit elementleri içermesi bazılarınında maliyeti yüksek elementlerden oluşması TEJ üretim maliyetini ve performansını etkileyen diğer faktörler olarak ele alınabilir.

Son 20 yılda TE teknolojiye dair yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak TEJ lerin verimliliğini doğrudan belirleyen en önemli parametre olan TE malzemeler ile ilgili olmuştur. Yeni TE malzemelerin keşfedilmesi ya da var olan TE malzemelerin verimliliklerinin artırılması bu çalışmaların ağırlıklı noktasını oluşturmuştur. Ancak malzeme verimliliği dışında modül performansını dolayısıyla da TEJ lerin verimliliklerini doğrudan etkileyen TE bacak boyutu, geometrik yapısı, bağlantı elemanlarının elektriksel ve termal dirençleri ya da Thomson etkisi gibi fiziksel olayların teorik ve deneysel yapısı yeterince irdelenmemiştir. Yine benzer şekilde esnek ya da rijit modüllerde doldurma yalıtım elemanlarının modül verimliliğine etkisi termoelektrik literatüründe yeterince tartışılmayan bir diğer husustur. Ayrıca TE modüllerin farklı enerji kaynakları ile beraber hibrit olarak kullanılma potansiyeline yönelik de literatürde oldukça kısıtlı çalışmalar bulunmaktadır. Yine farklı olarak modül performans ve maliyet ilişkisini ortaya koyan çalışmaların sayısıda literatürde oldukça kısıtlı olduğu görülmüştür.

TE literatürüne ait bu önemli problemlere dikkat çekmek ve bunlara yönelik çözüm önerileri üretmek bu tez çalışmasının amacını oluşturmaktadır. Özetle bu tez çalışmasında atık ısı elektrik enerji dönüşümü sağlayacak bazı TE sistemlerin teorik ve deneysel çalışmaları detaylı olarak yapılmış sonuçları ortaya konulmuştur. Yapılan bu çalışmaların bir kısmı ve sonuçları kısaca şu şekildedir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalardan biri, katmanlı TE bacak tasarımı yapılarak modül performansı test edilmiştir. TE modüller genellikle içinde barındırdığı bileşiklerden dolayı sadece belirli bir sıcaklık aralığı için uygun olabilmektedir. Buda çalışma aralıklarını sınırlamaktadır. Ancak yapılan çalışmada iki farklı TE bileşik grubu (BiSbTe chalgonedies ve $CoSb_3$ bazlı skutterudite) bileşiklerinden oluşan katmanlı TE bacak yapısı oluşturularak daha geniş bir sıcaklık aralığında enerji üretiminin mümkün olduğu ve enerji çıkış gücünün de bu oranda arttığı bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Böylece geniş bir sıcaklık farkında (500 ˚C) gibi atık ısı kaynaklarından daha fazla enerji üretimi sağlayabilecek modül tasarımı ve performans analizi yapılmıştır. 500 ˚C'lik bir sıcaklık gradyanında, katmanlı TEJ için 45 W'lık maksimum çıkış gücü ve buna karşılık gelen %15,7'lik enerji verimliliği elde edilmiştir. Katmanlı TEJ'in enerji verimliliği, katmansız TEJ'den %71 daha yüksek olduğu böylece katmanlı TEJ daha başarılı olduğu bu çalışma ile ortaya konulmuştur.

Bir başka çalışmada Thomson etkisi ve temas dirençlerinin modül performansı ve çıkış gücü üzerindeki etkisi incelenmiştir. TE modüllerin gerçek ve teorik performans sonuçları arasında genelde fark oluşmaktadır. Bu farkın genel kaynağının modülde kullanılan bağlantı elemanlarının elektriksel ve termal dirençlerinden kaynaklı olduğu düşünülür, ve genel olarak üç TE olaydan biri olan Thomson etkisi zayıf olduğu için bu karşılaştırmalarda ihmal edilir. Ancak bu tez kapsamında yapılan çalışmada Thomson etkisinin yüksek sıcaklık farklarında ihmal edilemeyecek derecede modül performansına etkisi olduğu görülmüştür. Benzer olarak

bağlantı elemanlarının temas direncinin ise modül performansı üzerinde çok düşük sıcaklıklarda dahi etkisinin olduğu bu çalışma ile ortaya konulmuş. Sonuç olarak Thomson etkisi dikkate alınmadan elde yapılan hesaplarda, çıkış gücü ve enerji verimliliği sırasıyla %2,66 ve %5,67 daha fazlahatalı (yüksek tahmin edildiği) olduğu görülmüştür. Temas dirençleri dikkate alınmadan aynı maksimum güç noktasındayken, çıkış gücü ve enerji verimliliğinde ise sırasıyla %19,4 ve %11,65 hatalı (yüksek değer) tahmin edildiği görülmüştür. Dolayısıyla modül performansının doğru hesaplanmasında hatalardan kaçınmak için, bu iki faktörün her zaman analize dahil edilmesi gerektiği bu çalışmanın önemli sonuçlarından biri olmuştur.

Tez kapsamında yapılan bir başka çalışmada güneş enerjisinden maksimum oranda enerji üretimi sağlayacak bir hibrit enerji üreteci tasarımı yapılmış TE modüllerin böyle bir sistemdeki etkisi analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında bir TE modül ve fotovoltaik hücreden (TE+FV) den oluşan hibrit üreteç genetik algoritma yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar TE+FV hücreden oluşan bir sistemin enerji üretim kapasitesinin bu sistemlerin tek başına kullanılmasından çok daha verimli olduğu görülmüştür.Sonuç olarak optimum parametrelerde 461,12 W ile en yüksek çıkış gücü ve %11,45 en yüksek enerji verimliliği elde edilmiştir. Ayrıca hibrit bir sistemde çalışan bir TEJ'nin optimum yük direncinin iç direncinden daha az olduğu yine bu çalışma ile ortaya çıkarılan önemli sonuçlardan bazılarıdır.

Bir başka çalışmada ise yoğunlaştırılmış fotovoltaik ve TE modülden oluşan bir hibrit enerji üretecinde (KFV+TE), TE modül ve PV hücre arasında kullanılacak temas elemanının performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analiz sonuçlarında PV ve TE modülden oluşan hibrit sisteminde KFV ve TE modül arasında ısı transferinin çıkış gücünde ve sistemin veriminde kritik rol oynadığı, ideal temas elemanının bakır metalinden ve yamuk geometride (minimum termal kayıp için) olması gerektiği ortaya konulmuştur. Souç olarak FV'nin farklı yüzey alanları için 6 ve 240'lık optimum konsantrasyon oranları belirlenmiş, TE bacak uzunluğunun mümkün olduğu kadar kısa (1mm) olması gerektiği bulunmuştur. Optimum konsantrasyon oranı 6 olan modelin maksimum çıkış gücü 12 W, optimum konsantrasyon oranı 240 olan modelin ise maksimum çıkış gücü 2,4 W olduğu ortaya konulmuştur.Bu sonuçlarla, konsantrasyon oranı ne kadar yüksek olursa, yüzey alanının o kadar küçük olması gerektiği sonucu ortaya konulmuştur.

Tez kapsamında yapılan bir başka çalışma ise TE modüllerin içerisinde hem izolasyon hem de modül mekanik özelliklerini güçlendirmek için kullanılan doldurma malzemelerinin TE modül performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Hava, PDMS ve poliüretan köpük gibi malzemeler doldurma malzemesi olarak kullanılmış bunların TE modülün verimliliği ve çıkış gücü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, havanın mevcut malzemeler içerisinde en ideal doldurma elamanı olarak kullanılacabileceğini göstermiştir. Havanın diğer malzemelere göre çok daha düşük termal iletkenliğe sahip olması nedeniyle bu modülün verimliliği daha yüksek çıkmıştır. Aynı şekilde, TE modüldeki bağlantı sayısının azaltılması, modülün performansını artırdığı anlaşılmıştır. 10,8 °C'lik bir sıcaklık gradyanında, hava dolgulu esnek TEJ için 155 $\mu W/cm^2$'lik en yüksek güç yoğunluğu elde edildi. Hava dolgulu rijit TEJ ise, 10,3 °C'lik bir sıcaklık gradyanında, en yüksek güç yoğunluğu 137,7 $\mu W/cm^2$'lik elde edilmiştir.

Son olarak tez kapsamında yapılan diğer çalışmada ise modül yapısında kullanılan bileşiklerin maliyet ve performansları arasındaki ilişki ortaya konuşlmuş ideal bir modül tasarımı yapılmıştır. Yüksek verimli TE modüller genel olarak yüksek saflıkta bileşiklerden yada doğada az bulunan elementlerden oluşan kompozisyonlardır. Buda maliyeti önemli oranda artırmaktadır. Buna karşın düşük maliyetli malzemelerden üretilen modüllerin ise verimlilikleri düşük olmaktadır. Yapılan bu çalışmada hem yüksek düşük maliyetli bileşik kombinasyonları

bir araya getirilerek maliyet ve verim arasındaki avantaj ilişkisi ortaya konulmuştur. Tellür bileşiklerinin %50'sinin selenitlerle değiştirildiği yeni düşük maliyetli TEJ, maksimum 8,65 mW çıkış gücüne ve %1,8'lik optimum enerji verimliliğine ulaşılmıştır. Yeni TEJ'in çıkış gücü ve enerji verimliliği, ticari TEJ'den %17,46 ve %38,4 daha düşüktür. Bununla birlikte, tellürün toksisitesinden ve kıtlığından kaynaklanan tehlike %50 oranında azalmıştır. Benzer şekilde, yeni TEJ'in toplam maliyet düşüşü, ticari TEJ'e kıyasla %32,14'tür. Çalışmanın sonuçları, böyle bir kombinasyonun kullanılması ile modül performansında önemli bir kayıp yaşamadan maliyeti düşürmenin mümkün olduğunu göstermiştir. Böylece atık ısı enerji üretiminde alternatif düşük maliyetli modül üretiminin mümkün olduğu ortaya konulmuştur.

Haziran 2022 , 138. sayfa.

Anahtar kelimeler: Termoelektrik sistemler, termoelektrik malzemeler, modül performansı, doldurma faktörü, temas direnci, fotovoltaik-termoelektrik sistemler, Thomson etkisi

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF DIFFERENT THERMOELECTRIC SYSTEMS PROVIDING WASTE HEAT-ELECTRICAL ENERGY CONVERSION

AMINU YUSUF

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Electrical and Electronics Engineering programme

Supervisor : Prof. Dr. Sedat BALLIKAYA

Depending on the development of technology, energy consumption is increasing day by day. The world energy consumption is predicted to reach 720 quadrillion BTU in 2026. A large part of the energy used today is met by fossil-based fuel products (petroleum, natural gas, coal, etc.). However, their use will be considerably limited soon due to the cost of extracting and processing these fuel sources, their negative effects on the environment and nature, and their unsustainability. For this reason, it is inevitable to find environmentally friendly sustainable energy sources to meet the increasing energy consumption. Recent studies have shown that thermoelectric (TE) material-based generators (TEGs) can play an important role in meeting energy needs as environmentally friendly sustainable energy sources. What makes TEGs important in energy production is their capacity to directly convert waste heat into electrical energy. That is, approximately 70% of the energy used in the world is directly rejected to the atmosphere as waste heat without undergoing any transformation. With TEGs, some of this energy can be directly converted into electrical energy. Compared to existing sustainable energy sources (solar panels, wind turbines, etc.), TEGs have advantages of not requiring maintenance, have low installation and operating costs, can work thousands of hours uninterruptedly and silently because they do not contain any mechanical gears, are not dependent on seasonal and geographical conditions in energy production, and are scalable. However, despite these major advantages, there are still some limitations that hinder large-scale use of TEGs. The highest among these is that their conversion efficieciny is not yet at the desired level. The TEGs consist

of a certain number of *n*-type and *p*-type TE legs connected electrically in series and thermally in parallel. Among the parameters that determine the energy efficiency of a TEG are the structure of the TE legs, the electrical and thermal resistances of the connectors and solders. Furthermore, the fact that some of the TE legs used in the TE module structure contain toxic elements and some of them are composed of costly elements can be considered as another factor that affects the large-scale application of the TEGs.

The studies on TE technology in the last 20 years have mainly been related to TE materials, which is the most important parameter that directly determines the efficiency of TEGs. The discovery of new TE materials or increasing the efficiency of existing TE materials have been the focus of these studies. However, the theoretical and experimental structure of physical phenomena such as TE leg size, geometric structure, electrical and thermal resistances, Thomson effect, which directly affect the module performance and thus the efficiency of TEGs, have not been adequately examined. Similarly, the effect of filling insulation elements on module efficiency in flexible or rigid modules is another issue that has not been sufficiently discussed in the thermoelectric literature. In addition, there are very limited studies in the literature on the potential of using TE modules as hybrids with different energy sources. And, studies relating the performance of a TEG and its cost are missing in the literature.

The aim of this thesis is to draw attention to these important research gaps, and propose solutions with view to improve the performance of the TEG systems. In summary, in this thesis, the theoretical and experimental studies of some TE systems that will provide waste heat electrical energy conversion have been made in detail and the results have been revealed. Some of these studies and their results are briefly as follows:

In one of the studies carried out within the scope of this thesis, the module performance was tested by designing a segmented TE leg. TE modules can only be operated within a certain temperature range, because the TE materials have high performance within a small temperature rage. While the larger the temperature gradient, the higher the energy conversion efficiency of the TEGs. To achieve high energy efficiency, a segmented TE module is analysed. The TE module is composed of two different TE compounds BiSbTe chalcogenides and $CoSb_3$-based skutterudites. Chalcogenides have high performance at low temperatures while the skutterudites have high performance at mid-range temperatures. Thus, chalcogenides are placed on the low temperature side, while skutterudites are placed on the hot temperature side, and it is found that the TE module can be operated at a temperature gradient of up to 500 ˚C. At a temperature gradient of 500 ˚C, a maximum simulated output power of 45 W and energy efficiency of 15.7% were achieved for the segmented TEG. The energy efficiency of the segmented TEG is 71% higher than that of the unsegmented TEG.

In another study, influence of Thomson heat and effect of contact resistances on the output performance of an unsegmented TE module were investigated. Generally, there is often a difference between the actual and theoretical performance of TE modules. The general source of this difference is thought to be due to the electrical and thermal contact resistances of the interfaces in the module. Likewise, most of the theoretical studies on TEGs neglect the effect of Thomson heat, this is because it's influence in comparison to Joule heat and Fourier's heat is small. Herein, within the scope of this thesis, it has been revealed that the Thomson heat has a non-negligible effect on the module performance at high temperature differences and must be considered in theoretical calculations. Similarly, it has been demonstrated that the electrical and thermal contact resistances at the interfaces have negative effect on the module performance even at very low temperatures. At maximum output power without considering the Thomson heat, the output power and energy efficiency are over estimated by 2.66% and 5.67%, respectively. While at the same maximum power point without considering contact resistances,

the output power and energy efficiency are over estimated by 19.4% and 11.65%, respectively. To avoid errors, these two factors should always be included in the analysis.
In another study conducted within the scope of this thesis, a hybrid energy generator designed to provide maximum energy production from solar energy was designed and the effect of TE modules in such a system was analyzed. Within the scope of this study, a TE module and a photovoltaic cell (TE+PV) hybrid system was analyzed and optimized via a multiobjective genetic algorithm. The results obtained show that the energy production capacity of a system consisting of TE+PV cells is much more efficient than the use of these systems alone. At the optimum parameters, the highest output power of 461.12 W and energy efficiency of 11.45% are obtained. The result also revealed that the optimum load resistance of a TEG operating in a hybrid system is less than its internal resistance.
In another study, the effect of the contact element to be used between the TE module and the PV cell on the performance of a hybrid (CPV+TE) was investigated. The analysis reveals that the heat transfer between the PV and TE module plays a critical role in the output power and efficiency of the system, and the ideal contact element should be copper metal and trapezoidal geometry (for minimum thermal loss). Results also reveal optimum concentration ratios of 6 and 240 for different surface areas of PV; it was also found that the length of thermoelement should be as short as possible say 1 mm. The model with optimum concentration ratio of 6 has a maximum output power of 12 W, while the model with optimum concentration ratio of 240 has a maximum output power of 2.4 W. These results indicate that the higher the concentration ratio the smaller the surface area of a PV.
In another study carried out within the scope of this thesis, the effect of filling materials used in TE modules to strengthen both insulation and module mechanical properties on TE module performance was investigated. Materials such as air, PDMS and polyurethane foam were used as filling materials and their effects on the efficiency and output power of the TE module were investigated. The results of the study showed that air can be used as the most ideal filling element among existing materials. The efficiency of this module is higher because air has much lower thermal conductivity than other materials. Likewise, reducing the number of junctions in the TE module enhances the performance of the module. At a temperature gradient of 10.8 °C, the highest power density of 155 $\mu W/cm^2$ is obtained for the flexible TEG with air filler, while at a temperature gradient of 10.3 °C, the highest power density of 137.7 $\mu W/cm^2$ is obtained for the rigid TEG with air filler.
Finally, one of the studies carried out within the scope of this thesis examined the effects of the cost and performance of the TE compounds used in the module structure. High efficiency TE modules generally consist of compositions of high purity compounds, this increases the cost significantly. On the other hand, the efficiency of the TE modules produced from low-cost materials is low. In this study, both high-cost and low-cost TE compounds were combined in a single TE module where a trade-off between a cost reduction and performance reduction is obtained. The novel low-cost TEG where 50% of tellurium compounds are replaced with selenides has a maximum output power of 8.65 mW and optimum energy efficiency of 1.8%. The output power and energy efficiency of the novel TEG are 17.46% and 38.4% less than that of the commercial TEG. However, the danger due to the toxicity of tellurium and its scarcity has reduced by 50%. Likewise, the overall cost reduction of the novel TEG is 32.14% in comparison to the commercial TEG. The results of the study showed that with the use of such a combination, it is possible to reduce the cost without any significant loss in the module performance. Thus, it has been demonstrated that alternative low-cost module production is possible in waste heat energy production.
June 2022, 138. pages.

Keywords: Thermoelectric systems, thermoelectric materials, module performance, filling factor, contact resistance, photovoltaic-thermoelectric systems, Thomson effect

1. GİRİŞ

Günümüzün önemli problemlerin başında hiç şüphesiz enerji gelmektedir. Teknolojinin gelişmesine ve insan nüfusunun artışına bağlı olarak tüketilen enerji miktarı da her geçen gün artmaktadır. Veriler dünya üzerinde tüketilen enerjinin 2019 yılı itibari ile 160 PWh 'ın üzerinde olacağını göstermektedir. Bugün kullanılan enerjinin yaklaşık %80' nifosil bazlı yakıt kaynaklarından karşılanmaktadır. Ancak bu enerji kaynaklarının, başta çıkarılması ve işlenmesindeki maliyet ile teknik zorluklar olmak üzere, çevreye ve doğaya verdiği zararlar ve en önemlisi de yenilenmeleri için binlerce yıl gerektirmesi gibi önemli problemleri bulunmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir çevreci enerji kaynaklarının bulunması kaçınılmazdır. Termoelektrik (TE) malzeme esasına dayanan Termoelektrik Jeneratörler (TEJ) sahip oldukları potansiyel nedeni ile enerji probleminin çözümünde bir umut kaynağı olmuştur. Şöyle ki dünya üzerinde kullanılan enerjinin yaklaşık %70' i atık ısı olarak hiçbir dönüşüme tabi tutulmadan atık ısı olarak atmosfere karışmaktadır. TEJ'ler in önemi, bu atık ısı enerjisinin bir kısmını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilme kabiliyetlerinden gelmektedir. TEJ ' ler TE modül olarak adlandırılan içlerinde berlirli sayıda n tipi ve p tipi yarıiletkenin elektrik olarak seri termal olarak paralel bağlanmış yapılardan oluşmaktadır (Meng ve ark., 2009; Rowe, 2006). Bir TE modül aynı zamanda mini bir TEJ olarak da değerlendirilebilir. TE malzeme olarak adlandırılan bu yarıiletken bileşiklerin özelliği bir sıcaklık farkına maruz kaldıklarında elektriksel potansiyel üretmeleri ya da tersi olarak içlerinden bir elektrik akımı geçirildiğinde ise akım yönüne göre iki yüzeyleri arasında bir sıcaklık farkı oluşturmalarıdır. Bu yarıiletkenler özel yeteneklerinden dolayı, başta elektronik endüstrisi olmak üzere otomotiv, medikal, savunma sanayi, uzay ve giyilebilir elektronik endüstrisi gibi pek çok alanda elektrik üreteci (TEJ) veya soğutucu (TEC) olarak yaygın olarak kullanılmaktadırlar. TEJ ve TEC ların mevcut klasik yenilenebilir enerji üreteçleri (güneş rüzgar vb) ya da soğutuculara (gaz çevrimli soğutucular) göre sessiz çalışma, binlerce saat aralıksız çalışma, bakım gerektirmeme, kurulum ve işletme maliyetlerinin düşük olması, geride atık bir ürün bırakmaması, enerji üretiminde mevsimsel veya coğrafik koşullara bağlı olmama gibi pek çok önemli avantajları bulunmaktadır. TEJ ve TEC lerin bu önemli avantajlarına karşın büyük ölçekli kullanımlarının önündeki en büyük engel verimliliklerinin henüz istenen seviyede olmamasıdır. Bu cihazların verimliliklerini belirleyen en önemli parametre değerlik katsayısıdır (Z). Detayları bölüm 2.7

verilen bu paremetre malzemenin üç fiziksel paremetresi olan Seebeck katsayısı (S), elektriksel iletkenlik (σ) ve termal iletkenlik (κ) ile belirlenir. Z parametresi ne kadar yüksek olursa TEJ ve TEC ların verimliliğide o kadar yüksek olmaktadır. Bu nedenle son 20 yılda TE alanında yapılan çalışmaların genel odak noktası yeni verimli TE malzemelerin geliştirilmesi ya da var olan TE malzemelerin verimliliğini artıracak yeni yaklaşımların geliştirilmesi olmuştur. Bu yaklaşımlardan bazılarını, mikro yapı mühendisliği, enerji bant yaklaşımı, nano yapı yaklaşımı, band indirgenmesi, yapı içinde çoklu saçılma merkezlerinin oluşturulması, fonon sıvı elektron kristal yaklaşımı (FSEK), fonon cam elektron kristal yaklaşımı (FCEK) gibi saymak mümkündür (Meng ve ark., 2009; Rowe, 2006). Yukarıda ifade edildiği gibi her nekadar TE alanında yapılan çalışmalar malzeme verimliliğinin artırılmasına yönelik yoğunlaşmış olsa da bu teknolojinin yaygınlaşmasında olumsuz etkisi olan ve TE cihazların verimliliğini doğrudan etkileyen başka parametreler de bulunmaktadır. Bunlar arasında, TE bacak boyutu, geometrik yapısı, bağlantı elemanlarının elektriksel ve termal dirençleri, modül yalıtım doldurma malzemesinin performans üzerindeki etkisi, malzeme içerisinde gerçekleşen fiziksel olaylardan Joule ve Thomson olaylarının modül performansına etkisi gibi sıralamak mümkündür. TE literatüründe yukarıda sıralanan bu parametrelere yönelik çalışmaların sayısı oldukça kısıtlıdır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların bir kısmı bu parametrelerin modül performansına etkisi ve ideal bir modülün oluşturulması için gereken optimizasyon değerlerinin tespit edilmesini kapsamaktadır. TE literatürde kısıtlı olan bir diğer husus ise TE modüllerin farklı enerji sistemleri ile hibrit olarak kullanılmasına yönelik deneysel ve teorik yaklaşımların az olmasıdır. Bu tez kapsamında yapılan diğer çalışmalar ise fotovoltaik (FV) ve TE modülden oluşan hibrit bir enerji üretecinin performans analizinin yapılması ve yine benzer olarak konsantre fotovoltaik güneş hücresi ile bir TE modülden oluşan sistemde, modül ve PV hücre arasındaki temas malzemesinin hibrit üretecin enerji üretim performansına etkisi ele alınmıştır. Ayrıca modül performans ve maliyet ilişkisi bu tez kapsamında incelenerek düşük maliyetli fakat yüksek verimli modül geliştirilmesine yönelik sonuçlar irdelenmiştir.

Özetle, bu tez çalışmasında atık ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilecek farklı TE sistemlerde modül performansını belirleyen parametreler ele alınmış, TE sistemlerin hibrit enerji üreteçleri ile beraber kullanılma potansiyelleri ortaya konulmuş ve son olarak düşük maliyetli fakat daha yüksek verimli modül geliştirilmesine yönelik deneysel ve teorik sonuçlar ortaya konulmuştur.

1.1. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ

Enerji krizinin dünya gündemine geldiği 1990 lı yıllardan itibaren tüm yenilenebilir enerji kaynaklarında olduğu gibi TE teknolojiye dair çalışmalar da büyük bir ivme kazanmıştır. Web of Science verilerine göre termoelektrik alanında son 5 yılda yapılan çalışmalar bu zamana kadar yapılan tüm çalışmaların yaklaşık %70'ni oluşturmaktadır. Bu durum TE konusunun son yıllarda kazanmış olduğu ivmeyi ve önemi göstermesi açısından önemlidir. TE modüller, elektrik üreteci ya da soğutucu olarak kritik uygulama alanlarına sahiptir. Bunlar arasında uzaya gönderilen uydular veya derin uzay araştırmaları için kullanılan robotların enerji ihtiyacının karşılanması (Radioizotop Termoelektrik Jeneratör-RTG), hassas elektronik parçacıların soğutulması, otomobillerde atık egzos gazının elektrik enerjisi olarak kazanılması, mikro görüntüleme cihazlarının etkin görüntülemesinde kullanılması, giyilebilir elektronik cihazların enerji ihtiyacının karşılanması, network bağlantı ekipmanlarının enerji ihtiyaçlarının karşılanması gibi sıralamak mümkündür. TE modüllerin teknolojik açıdan önemini artıran en önemli faktör atık ısıyı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilme özelliklerinden gelmektedir. Dünya üzerinde kullanılan enerjinin yaklaşık %70 'i atık ısı enerjisi oluşturmaktadır. TEJ ile bu muazzam kayıp enerjinin bir kısmı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürelebilmektedir. Bugün TEJ ler enerji üretim kapasiteleri keV mertebesine ulaşmış olsa da büyük ölçekli elektrik üretimlerinde kullanılmaları için birkaç yüz keV ya da MeV mertebesine ulaşmaları gerekmektedir. Ancak bu durumda güneş panelleri ile rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile rekabet edebilecek seviyeye ulaşacaktır. Dolayısıyla TE alanında yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak TEJ lerin ana yapısını oluşturan ve enerji dönüşümü sağlayan TE bileşiklerin verimliliklerinin artırılmasına yönelik olmuştur. Ancak TEJ lerin verimliliklerini belirleyen başka önemli parametreler bulunmakta ve bu parametrelerin belirlenmesi, optimize edilmesi yeni geliştirilecek TEJ lerin verimini artırması açısından önemlidir.

Bu tez çalışmasında özellikle malzeme performansı dışında TE modüllerin verimini etkileyebilecek bazı parametreler örneğin bacak boyutu, geometrisi, bağlantı elemanlarının elektriksel ve termal temas direnci, yalıtım doldurma malzemelerinin termal iletkenlikleri gibi parametreler detaylı analiz edilmiş, yüksek verimli modül üretiminin geliştirilmesinde yol göstermesi hedeflenmiştir. Ayrıca modül TE modüllerin farklı yenilenebilir enerji sistemleri ile kullanılma potansiyelleri (PV+TE) detaylı olarak analiz edilmiş maksimum enerji üretiminde gerekli optimizasyon parametreleri belirlenmiştir. Son olarak TE modül üretim maliyet ve

performans arasındaki ilişki deneysel olarak detaylı incelenerek düşük maliyetli fakat yüksek verimli modüllerin üretimine yönelik araştırmalara öncülük edebilecek sonuçlar elde edilmiştir.

1.2. AMAÇ VE HEDEFLER

Bu tezin amacı atık ısı elektrik enerjisi dönüşümü sağlayan farklı TE sistemlerin teorik ve deneysel açıdan detaylı olarak incelenmesidir. Farklı sistemlerden kasıt burada atık ısı enerji dönüşümü sağlayacak TE modüller olup bu tez çalışmasında TE modüllerin performansını etkileyen parametrelerin detaylı olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Bunların dışında, TE modül performans-maliyet ilişkisinin ortaya konulması, TE modüllerin hibrit elektrik üreteçlerinde (TE+PV) etkisinin ve performans analizi de bu çalışmanın diğer amaçları arasında yer almaktadır. Maliyet ve modül performansı çalışmasında hedef düşük maliyetli fakat yüksek performanslı modül üretiminin gerçekleştirilmesidir.

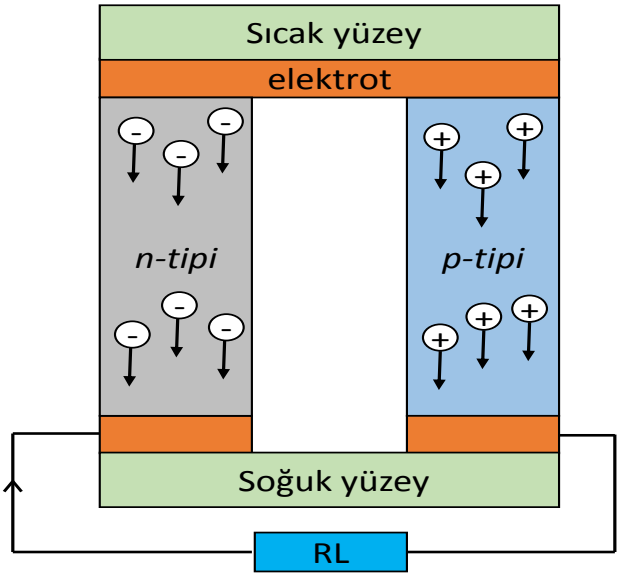
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. TERMOELEKTRİK OLAY

Termoelektrik jeneratörler TE malzeme esasına dayanırlar. Bu malzemeler iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı yaratıldığında elektrik üretirken, içlerinden elektrik akımı geçirildiğinde ise sıcaklık farkı oluşturabilen eşsiz malzemelerdir. Bir TEJ' in enerji üretimi sırasında malzeme içerisinde beş temel fizik olayı gerçekleşir. Bunlar sırasıyla, Seebeck etkisi, Peltier etkisi, Thomson etkisi, Joule ısısı ve Fourier ısısı oluşumudur (Chen ve ark., 1996a).

2.2. SEEBECK ETKİSİ

Seebeck etkisi 1821'de Thomas Johann Seebeck tarafından keşfedilmiştir. Seebeck, iki farklı metalin birleşim noktalarının farklı sıcaklıklarda tutulması durumunda bir voltaj üretilebileceğini göstermiştir (Goldsmid, 2010). Metallerin yüksek termal iletkenlik ve düşük Seebeck katsayısına sahip olmaları nedeniyle modül yapısında kullanımı tercih edilmemektedir. Bunun yerine düşük termal iletkenliğe ve yüksek Seebeck katsayısına sahip *n* – ve *p* – tipi yarı iletkenler kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi iki yüzey arasında sıcaklık farkı yaratıldığında yük taşıyıcıları (elektronlar ve delikler) sıcak yüzeyden soğuk yüzeye doğru akmaktadır. Buda, her iki tarafta yük dengesinin bozulmasına neden olarak soğuk tarafta yük taşıyıcılarının birikmesine yol açmaktadır. Bu yük birikmesinden dolayı oluşan potansiyel farkı ile buna neden olan sıcaklık farkı doğru orantılıdır. Bu orana Seebeck katsayısı denir ve her malzemeye özgü fiziksel bir parametredir.



Şekil 2.1: Tek çiftten oluşan bir termoelektrik jeneratör yapısı.

Seebeck olayında oluşan gerilim , sıcak ve soğuk yüzeyler arasında arasındaki sıcaklık farkıyla orantılıdır. Bunun matematiksel ifadesi

$$V = \mathrm{N}S_{pn}\Delta\mathrm{T} \tag{2.1}$$

ile gösterilmekte olup burada V açık devre gerilimini, N termo çift sayısını, , S_{pn} n – ve p – tipi bacakların Seebeck katsayısını ve ΔT ise sıcaklık gradyanını temsil etmektedir. N – tipi bacaktaki çoğunluk taşıyıcıları olarak elektronların varlığı nedeniyle Seebeck katsayı negatiftir. P- tip bacakta ise çoğunluk taşıyıcıları olarak deliklerin varlığı nedeniyle Seebeck katsayı pozitiftir.

Ohm yasasına dayanarak, voltaj potansiyeli, yarı iletkenlerden akan elektrik akımıyla da orantılıdır ve akış yönü elektronların akış yönüne zıttır. Dolayısıyla Şekil 2.1 deki gibi bir TE çiften oluşan devrede elektrik akımı şu şekilde verilir:

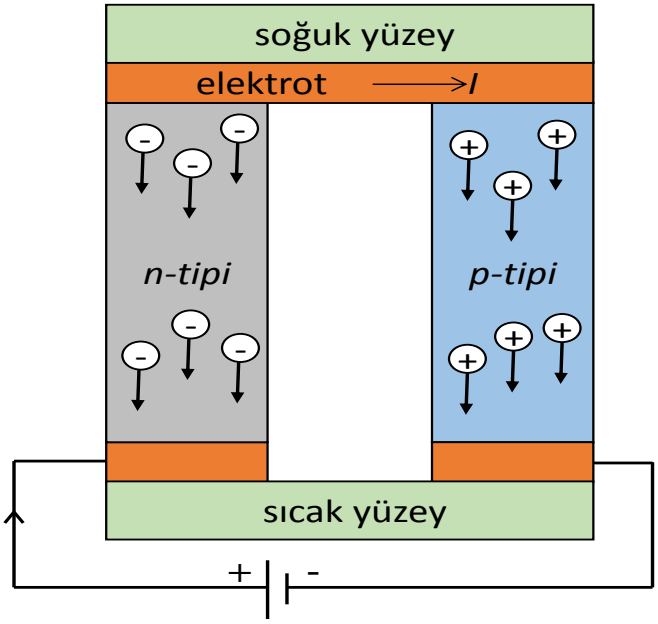
$$I = \frac{\mathrm{N\ Spn\ \Delta T}}{R_L + R_i} \tag{2.2}$$

burada R_L yük direnci ve R_i termokupulların iç direncini göstermektedir. Sıcaklık farkı ile oluşan bu elektrik enerji üretimine Seebeck etkisi denir.

2.3. PELTIER ETKİSİ

Seebeck olayının tersi olarak da bilinen Peltier etkisi, 1834 yılında Jean-Charles-Athanase Peltier tarafından keşfedilmiştir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi aynı termokupların terminallerine bu sefer bir akım verildiğinde akım yönüne bağlı olarak birleşim noktalarında ısınma veya soğuma (q) meydana gelir. Isınma ve soğuma (q) oranı uygulanan akım ile orantılıdır (Goldsmid, 2010). Akımın akışının yönü Peltier katsayısının işaretini ve bağlantı noktalarından hangisinin ısınıp hangisinin soğuduğunu belirler. Matematiksel olarak bu etki ise şöyle ifade edilir:

$$\Pi_{pn} = \frac{q}{I} \tag{2.3}$$



Şekil 2.2: Tek çift termoelektrik soğutucu.

Elektrik akımı ile sıcaklık farkının oluşturulması ise Peltier etkisi olarak adlandırılır.

2.4. THOMSON ETKİSİ

1854'te William Thomson hem Seebeck hem de Peltier etkilerini inceledi ve ikisini birbirine bağlayan bir ilişki kurdu, matematiksel olarak bu ilişki denklem 2.4'deki gibidir.

$$\Pi_{pn} = S_{pn}\mathrm{T} \tag{2.4}$$

Thomson etkisi, üzerinde bir sıcaklık gradyeni bulunan tek bir iletkenden bir elektrik akımı geçirildiğinde iletken boyunca hem ısı yayılımı hemde ısı emilimi gerçekleşir

(https://www.britannica.com/science/Thomson-effect, Erişim tarihi: 23 Aralık 2021). Thomson katsayısı şu şekilde belirlenebilir:

$$\tau = T\frac{dS_{pn}}{dT} \tag{2.5}$$

2.5. JOULE ISISI ETKİSİ

Bir elektrik akımı bir iletkenden geçtiğinde, iletkenin direnci akımın akışına karşı çıkar ve iletkenin ısınmasına neden olur (https://www.comsol.com/multiphysics/the-joule-heating-effect., 23 Aralık 2021). Isının büyüklüğü (Joule ısısı), iletkenden geçen elektrik akımının miktarına ve denklem 2.6'de verildiği gibi iletkenin direncine bağlıdır.

$$J_h = I^2 R_i \tag{2.6}$$

Elektrikli ısıtıcılar, elektrikli sobalar, lehimleme ürüleri, mikrodalga ve diğerler bazı uygulamalarda joule ısısı temel olarak istenen bir durum olsa da TE jeneratörlerde (TEJ) bu istenmeyen bir durumdur.

2.6. FOURIER ISISI

Bir TEJ içerisinde gerçekleşen diğer bir fiziksel olay ise Fourier ısısıdır. TEJ de sıcak taraftan TE bacaklarının soğuk tarafına ısı transferi Fourier ısı iletim yasası ile gerçekleşmektedir. Buna göre bir iletken aracılığıyla taşınan ısı miktarı, malzemenin termal iletkenliği akış alanı ve iletken boyunca oluşan sıcaklık gradyanı ile doğru orantılı, iletkenin uzunluğuyla ters orantılıdır. Bu olayın matematiksel tasviri ise şu şekildedir.

$$Q_F = kA\frac{T_h - T_c}{L} \tag{2.7}$$

2.7. DEĞERLİK KATSAYISI

TE figure of merit olarak adlandırılan değerlik katsayısı, bir malzemenin iyi TE özelliğe sahip olup olmadığını belirleyen bir parametredir. İlk kez Abram Fedorovich Ioffe tarafından yapılan çaışmada, bir TE malzemesinin performansının boyutsuz verimlilik ölçümü ya da değerlik katsayısı (zT) olarak bilinen bir faktörle elde edilebileceği gösterilmiştir. Buna göre iyi bir TE malzeme (zT değeri yüksek) Seebeck katsayısı ve elektriksel iletkenlik değeri yüksek buna karşın termal iletkenliği düşük olmalıdır (A.F. Ioffe, 1957).

$$zT = \frac{\sigma S^2}{k_L + k_e} T \tag{2.8}$$

Burada T mutlak sıcaklığı r, S malzemenin Seebeck katsayısı, σ bir malzemenin elektriksel iletkenliğini, k_L ve k_e ise sırasıyla bir malzemenin kafes ve elektronik termal iletkenliklerini göstermektedir.

Denklem 2.8 de verilen transport parametrelerinin (S, σ ve k) birbiri ile doğrudan ilişkili olması zT değerinin istenen oranda artırılmasını sınırlamaktadır. Örneğin, iletkenliği çok düşük malzemelerde Seebeck katsayısı yüksek olurken elektriksel iletkenlik ile kafes ve elektronik termal iletkenlik değerleri düşüktür. Buna karşın metal gibi elektriksel iletkenliği yüksek malzemelerde, Seebeck katsayı değeri düşük , elektriksel iletkenlik ile, kafes ve elektronik termal iletkenlik değerleri ise yüksektir. Her iki durumda da düşük zT değerleri elde edilmesine yol açabilmektedir. Yüksek bir zT değeri elde etmek için, Seebeck katsayısı ve elektrik iletkenliğinin nispeten yüksek ve toplam termal iletkenliğin ise düşük olduğu yarı iletkenleri kullanmak idealdir. Termoelektrik jeneratörlerin diğer enerji kaynaklar ile rekabetçi olması için, zT değeri en az 3 olmalıdır (Liu ve Chen, 2020). Bu yüksek değer henüz elde edilememiştir ve bu nedenle yüksek zT değerini elde etmenin yollarını araştırmak birçok araştırmacının da temel motivasyonunu oluşturmuştur.

TE malzemelerde taşınım olayının anlaşılması için arkasındaki fizik olayını anlamak önemlidir. Aşağıdaki denklemler taşınım özelliklerinin bağlı olduğu temel parametreler hakkında daha fazla ayrıntı vermektedir (J. H. Kim vd., 2015; S. Zhao vd., 2019).

$$S = \frac{8\,\pi^2 K_B^2}{3\,e\,h^2}\; T\; m^* \left(\frac{\pi}{3n}\right)^{2/3} = \pm\frac{K_B}{e}\left(\frac{(r+5/2)F_{r+3/2}(\eta)}{(r+3/2)F_{r+1/2}(\eta)} - \eta\right) \tag{2.9}$$

$$\sigma = n_c\; e\; \mu_c = \frac{n_c\; e\; v_d}{E} \tag{2.10}$$

$$k_e = L_n T\; \sigma \tag{2.11}$$

$$k_L = \frac{v_p\; l\; C_v}{3} \tag{2.12}$$

Denklem 2.9, Seebeck katsayısının mikroskopik ölçekteki tanımını, 2.10 elektriksel iletkenlik 2.11 elektronik termal iletkenlik ifadesini göstermektedir. Denklem 2.11'de, metaller için Lorenz sayısı 2.45 × 10-8 W Ω K^{-2} iken, dejenere yarı iletkenler için şu şekilde elde edilebilir:

$$L_n = \left(\frac{K_B}{e}\right)^2 \left(\frac{(r+7/2)F_{r+5/2}(\eta)}{(r+3/2)F_{r+1/2}(\eta)} - \left(\frac{(r+5/2)F_{r+3/2}(\eta)}{(r+3/2)F_{r+1/2}(\eta)}\right)^2\right) \quad (2.13)$$

burada K_B Boltzmann sabiti, m^* etkili kütle yoğunluğu, e elektron yükü, n_c taşıyıcı konsantrasyonu, μ_c taşıyıcı hareketliliği, v_d sürüklenme hızı, E ise elektrik alanını göstermektedir.L_n Lorenz numarası, v_p fonon hızını, l fononların ortalama serbest yolunu, C_v sabit hacimde kafes ısı kapasitesini, r = - 0.5 saçılma parametresini, $\eta = E_F / (K_B T)$ indirgenmiş Fermi integralini, E_F Fermi enerjisini $F_n(\eta) = \int_0^\infty \frac{x^n}{e^{x-n}+1} dx$, ise *n' ci* dereceden Fermi integralini göstermektedir. Eğer Seebeck katsayısı ölçülürse, Fermi integrali denklem 2.9'den elde edilebilmektedir. Denklem 2.9 - 2.13 arasında verilen ifadeler *zT* değerini belirleyen fiziksel parameterlerin birbiri ile ilişkisini tanımlamakta ve yarıieltkenlerin neden ideal TE bileşikler olduğunu ortaya koymaktadır.

2.8. TERMOELEKTRİK MALZEMELER

Denklem 2.6 ve denklem 2.7'de görüldüğü gibi, hem Joule ısısı hem de Fourier ısısı malzeme performansını doğrudan etkilemektedir. Modülün performansını artırmanın yollarından biri bacağın iç direnci ve termal iletkenliği mümkün olduğunca küçük hale getirilerek Joule ısısı ve Fourier ısısı etkisinin azaltılmasıdır. Bir TE malzemesinin iç direncinin düşürülmesi, elektrik iletkenliğini artırabilecek uygun bir dopant ile sağlanabilir. Elektriksel iletkenlikteki artış denklem 2.11 de görüldüğü üzere termal iletkenliği de elektronik katkıdan dolayı artırmaktadır. Dolayısıyla elektriksel iletkenliği artırarark zT değerini istenen oranda artırmak zordur. Bu nedenle, araştırmacılar genellikle elektriksel iletkenliği artırmak yerine termal iletkenliğin azaltılmasına ve bunun için kafes termal iletkenlik katkısının düşürülmesine odaklanmıştır. TE malzemelerinin performans'ını yükseltmek için kullanılan yaklaşımlardan bazıları, durumların yoğunluğunu artırmak için bant rezonans durumlarının kullanılması (Heremans ve ark., 2008), Fonon Sıvı Elektron Kristalleri (FSEK) (Liu ve ark., 2012) ve Fonon Cam Elektron Kristalleri (FCEK) (Beekman vd., 2015) yaklaşımlarının kullanılması gibi sıralanabilir. Hem FSEK hem de FCEK yaklaşımlarının temeli, malzemenin elektronik kısmı (elektriksel iletkenlik) kristal gibi olmalı, fonon kısmı (termal iletkenlik) sırasıyla sıvı ve cam gibi olmasına dayanır. Bu yaklaşımların uygulandığı bazı TE malzeme gruplarını, Te elementi içeren farklı TE bileşiklere yönelik çalışmalar (Biswas ve ark., 2012; Hamawandi vd., 2020a, 2020b), selenyumbazlı olan malzemeler (Ballıkaya vd., 2019a; Demirci vd., 2021; H. Kim ve ark., 2015; Öztan vd., 2020), skutterudites bileşikleri (Ballıkaya vd., 2013b; Ballıkaya ve Uher, 2014; Prado-Gonjal ve ark.,

2017; Rogl ve ark., 2014), metal oksitler (Feng ve ark., 2018; Li ve ark., 2001), clathrates (Deng ve ark., 2012; Roudebush vd., 2011; Shi ve ark., 2010), yarı heuslers (Maji ve ark., 2013; Poon, 2018; Yu vd., 2009), perovskitler (Bocher vd., 2009; Wu ve Gao, 2018), farklı düşük maliyetli malzemeler (Biswas, 2019; Fan vd., 2015; Ge ve ark., 2016; Mao vd., 2019, 2018; Wei ve ark., 2018) saymak mümkündür.

2.9. TERMOELEKTRİK JENERATÖRÜNÜN PERFORMANSINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

TEJ ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren alternatif enerji dönüştürücülerinden biridir (Shin ve ark., 2015). Enerji dönüştürme işlemi gece gündüz, kirlilik ve titreşim olmadan gerçekleşebilir (Liu ve Chen, 2020), ve genellikle TEJ'lerin ömrü yaklaşık 200 Kh'dir ("Everredtronics termoelektrik modül üreticisi, Erişim tarihi: 12.26.21). TE cihazlarının büyük ölçekli kullanımlarının önündeki en büyük engel, düşük enerji dönüşüm verimliliğidir. Daha önce de belirtildiği gibi, bir TE cihazının çalışması Joule ısısına , Fourier'in ısısına, Thomson etkisine, Seebeck etkisine bağlıdır, bu etkilerin bazıları cihazın performansını engelleyici rol oynamaktadır. Bu olayların dışında TE modül dolayısıyla da TEJ lerin performansını etkileyen başka parametrelerde vardır. Bunlar radyasyon ve konveksiyon (Yusuf ve Ballıkaya, 2020) kayıpları, ve elektriksel ve termal temas dirençleri (Yusuf ve ark., 2021a) bir TE cihazının performansını büyük ölçüde etkileyebilen diğer faktörlerdir.Bir TE modülün teorik olarak, maksimum enerji dönüşüm verimliliği bir ısı pompasının Carnot çevrim verimliliği ile sınırlıdır (Gaurav ve Pandey, 2017).

2.9.1. Konveksiyon ve Radyasyon Kayıpları

Modül vakum altında tamamen tutulmadıkça, TE modüllerin çalışması sırasında her zaman konveksiyon kayıpları oluşmaktadır. Bunun nedeni, hava moleküllerinin sıcak taraftan soğuk tarafa aktarılan enerjinin bir kısmını emmesi ve yansıtmasıdır. Bu durum bacaklar tarafından kullanılabilecek genel ısı enerjisinin azalmasına neden olmaktadır. Öte yandan, hava moleküllerinin varlığı da sıcak ve soğuk taraflar arasındaki sıcaklık gradyanını arttırmaktadır (Yusuf vd., 2021b). Havanın hızı ne kadar yüksekse, konveksiyon kayıpları da o kadar yüksek olmaktadır. Bu nedenle, hava molekülleri akışı optimum hızda tutulması durumunda, konveksiyon kayıpları olumsuz etki yerine iki yüzey arasındaki sıcaklık gradyentini artırdığı için TE modülünün performansını artırabilecek şekilde olumlu etki gösterebilmektedir. Modülün sızdırmaz olup olmamasına bakılmaksızın, bir TE modülün çalışması sırasında

yüzeyden yüzeye veya yüzeyden ortama radyasyon kayıplarıda her zaman olabilmektedir. Bunun nedeni ise, radyasyonun ısıyı aktarmak için bir ortama ihtiyaç duymaması ve her TE bacağının sıfırdan büyük bir emisyon değerine sahip olmasıdır. Radyasyon kayıpları, TE bacaklar tarafından yararlanılan ısı enerjisini de azaltmaktadır. Radyasyon kayıpları malzemelerin emisyon değerleri ile orantılıdır. Emisyon değerinin 0 olduğu malzemeler tam yansıtıcı 1 olduğu malzemeler ise tam emici (black body) olmaktadır. TE bileşiklerde bu değer 0.4 civarındadır. Quayang ve diğerlerinin yaptığı çalışmada malzemelerin emisyon değerlerini 0-1 aralığında değiştirerek modül çıkış gücü üzerindeki etkisi incelenmiş radyasyon kayıplarının TE modülünün çıkış gücü üzerinde çok az etkisi olduğu görülmüştür (Ouyang ve Li, 2016). Modül içinde TE bacaklar arasında dolgu malzemesi olarak bir yalıtkanın kullanılması durumunda radyasyon ve konveksiyon kayıpları minimize edilebilmektedir (Bjørk vd., 2014).

2.9.2. Elektriksel ve Termal Temas Dirençler Nedeniyle Kayıplar

Yüzey pürüzlülüğü veya arayüze uygulanan aşırı basınç nedeniyle temas dirençleri oluşur. Bir TE modülün performansındaki en önemli kayıp kaynağı temas direncidir. Elektriksel temas direnci sadece elektrotlar ile TE bacaklar arasında ya da katmanlı bacaklar arasındaki arayüzde oluşurken, termal temas direnci tüm arayüzeylerde oluşmaktadır. Elektriksel temas direncinin etkisi joule ısısı etkisine benzer olup, elektrik akımın arayüzeylerden geçerken karşılaştığı direnci gösterirken, termal temas direnci ısının tüm yüzeylerden geçerken karşılaştığı direnci yansıtır. Katmanlı termoelektrik jeneratörlerde, modülün enerji dönüşüm verimliliğinin önemli ölçüde düşmemesi için maksimum temas direnci değeri vardır (Bjørk, 2015). TE bacaklar ve kavisli ısı kaynağı arasındaki geometrik uyumsuzluk temas direncinde artışa neden olduğu ortaya konulmuştur, bu nedenle temas direncini azaltmak adına yuvarlak TE modül yapısı önerilmiştir (Zhang ve ark., 2018). Bir TE modülünün tüm çalışma sıcaklıklarında temas direnci bulunduğundan, mümkün olduğunca minimumda tutulmalıdır (Yusuf vd., 2021a).

Arayüzde, TE-TE malzemeleri ile lehim-TE malzemesi arasında reaksiyon olabilmekte ve bu da temas direncinin oluşmasına ve TE modül performansının olası bozulmasına yol açabilmektedir (Wu ve ark., 2018). TE malzemeler ya da TE malzeme-lehim arasındaki bu etkileşimden kaynaklı intermetalik bileşiklerin oluşumunu bastırmak ve aynı zamanda iyi bir elektriksel bağ sağlanması için, genellikle aralarına (temas yüzeyleri arasında) çok ince bir difüzyon bariyeri yerleştirilir. Ni, Pt, Ti, Co-P, Au ve Ni-P gibi elementler TE modüllerde difüzyon bariyerleri olarak kullanılmaktadır (Shi ve ark., 2016; Song ve ark., 2014; Wu ve ark.,

2018; Zybala ve ark., 2009). Difüzyon bariyerinin termal genleşme katsayısının değeri elektrot ve TE malzemelerininkine benzerse, termal uygulama sırasında arayüzdeki uyumsuzluk sorunu önlenebilir. Difüzyon bariyerleri olarak iki seviye metalizasyonu (Park ve ark., 2017) ve çok katmanlı metalizasyon (Kim ve ark., 2017) elektrik temas direncini en aza indirmenin etkili yollarından bazılarıdır. Arayüze termal macun uygulanarak eldeki termal temas direnci azaltılabilmektedir. Bu genellikle ısı kaynağı ve TE modül arasında veya bir TE modül ile bir ısı emici arasında olduğu gibi harici olarak uygulanmaktadır.

2.9.3. Thomson Etkisi Nedeniyle Kayıplar

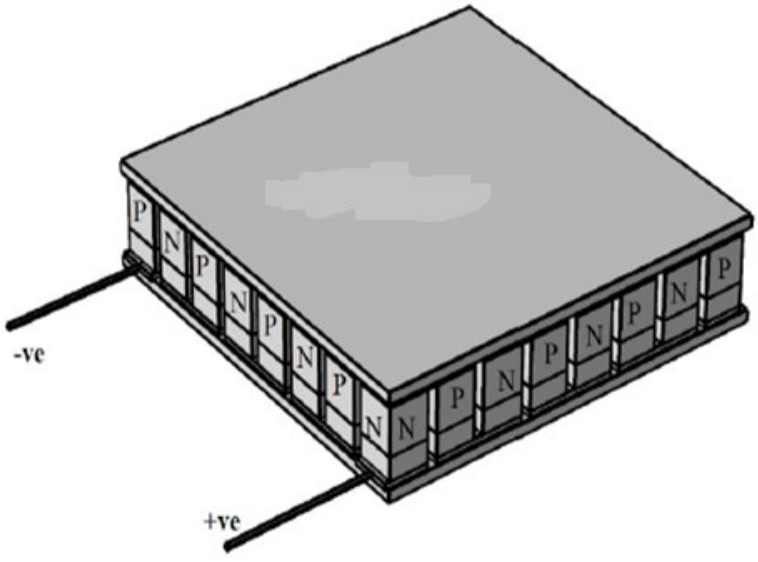
Thomson etkisinin bir TE modülün çıkış performansı üzerindeki etkisini içeren en eski çalışmalardan biri Chen ve ark. (1996 b) tarafından yürütülmüştür. Analizleri, Thomson etkisinin yarısının sıcak ve soğuk birleşim noktalarının her birine doğru hareket ettiği varsayımıyla daha da basitleştirilmiştir (Lamba ve Kaushik, 2017). Pang ve Zhang (2020), Thomson etkisi göz önünde bulundurularak bir dairesel TE modülün performansını analiz etmiştir. Bu çalışmada, Thomson etkisinin modülün çıkış performansını düşürdüğü ortaya konulmuştur. Fraisse ve arkadaşları (2013), Thomson etkisinin dahil olmadığı basitleştirilmiş bir modeli ve Thomson etkisinin dahil edildiği sonlu eleman yöntem (FEM) modelini kullanarak modül performansını analiz etmiştir. İyi bir doğruluk için ve Seebeck katsayısının sabit olarak kabul edildiği durumlarda, Thomson etkisinin modele dahil olmaması gerektiği bulunmuştur. Kalteh ve Garmejani (2019), Thomson etkisinin Bi-Te ve Pb-Te olmak üzere iki farklı alaşımdan oluşan TE modüllerin performansı üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Çalışmada, 650 K'nin altındaki sıcak yüzey sıcaklıklarında, Thomson etkisinin TE modüllerinin çıkış gücünü düşürdüğü ortaya koyulmuştur. Bununla birlikte, sıcak yüzey sıcaklığının 650 K geçtiği sıcaklıklarda ise Thomson etkisinin modülün çıkış gücünü artırdığı ortaya konulmuştur. Suárez ve ark. (2020) yaptığı çalışmada, Thomson etkisinin yüksek sıcaklık gradyanı ile çalışan ve düşük Seebeck katsayısına sahip bir TE modülün performansını artırdığı buna karşın düşük sıcaklık gradyanı ile çalışan ve yüksek Seebeck katsayısına sahip modülün performansını ise azaltığı rapor edilmiştir. Bir TE modülünün performansını etkileyen faktörler arasında, Thomson etkisi bir TE modülünün çıkış performansı üzerinde en az etkiye sahip olan fiziksel olay olup bu etki düşük sıcaklık gradyanlarında önemsizdir.

2.10. ATIK ISI-ELEKTRİK ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ KAPSAMINDA FARKLI TERMOELEKTRİK SİSTEMLER ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Daha önce tartışılan kayıplar nedeniyle, bir TE modülünün çıkış performansı diğer enerji dönüştürücülerine kıyasla düşük kalmaktadır. Bu nedenle TE modüller genellikle analiz edilmek ve çıkış performansını artırmak için optimize edilmektedir. Bu tezde, TE modüllerinin elektrik çıkış performansının artmasını sağlamak için farklı termoelektrik sistemler analiz edilmektedir.

2.10.1. Katmanlı Modül Tasarım Ve Performans Analizi

Denklem 2.1'den, sıcaklık gradyanındaki artışla elektrik gerilimin arttığı görülmektedir. Geniş bir sıcaklık gradyant aralığında bir TEJ'nin çalıştırılması arzu edilir. Bununla birlikte, TE malzemelerin verimi sıcaklığa bağlı olduğundan, geniş bir sıcaklık aralığında verimli çalışabilen tek bir malzeme bulmak zordur. Bu nedenle TEJ ler ancak belirli bir sıcaklık aralığı için verimli olabilmektedir. TEJ' lerin geniş bir sıcaklık gradyentinde verimli olmalarını sağlamanın yöntemlerinden biri modül yapısında kullanılan TE bacakların katmanlı yapıda olmasını sağlamaktır. Katmanlı TE modülde, Şekil 2.3'de gösterildiği gibi, modül yapısında kullanılan her bir *n*-tipi ve *p*-tipi TE bacak iki veya daha fazla TE malzeme (bileşik) oluşmaktadır.



Şekil 2.3: Katmanlı termoelektrik modül (Yusf ve Ballikaya, 2020).

Böyle bir TE modülün değerlik katsayısı (*ZT*) hesaplanmasında modülde kullanılan tüm malzemelerin fiziksel parametrelerinin kullanılması gerekmektedir.

$$ZT = \frac{(S_{ph}+S_{pc}+|S_{nh}|+|S_{nc}|)^2 T}{\{[(K_{ph}+K_{pc})(P_{ph}+P_{pc})]^{\frac{1}{2}}+[(K_{nh}+K_{nc})(P_{nh}+P_{nc})]^{\frac{1}{2}}\}^2} \quad (2.14)$$

Burada *c* ve *h* alt simgeleri soğuk ve sıcak tarafları temsil eder, *k, ρ, S* sırasıyla termal iletkenlik, elektriksel direnç ve Seebeck katsayısıdır.

Katmanlaştırma, düzgün bir şekilde yapılırsa, yüksek enerji dönüşüm verimliliği ile sonuçlanabilir. Katmanlı modülde, iyi elektrik performansının (çıkış gücü yüksek) sağlanması için benzer yapısal ve elektronik özelliklere sahip TE malzemeler kullanılmalıdır. Ayrıca, termal gerilimi azaltmak için benzer termal genleşme katsayısına sahip TE malzemeler kullanılmalıdır. Katmanlı yapıda kullanılan malzemelerin elektronik ve termal özelliklerinin karşılaştırılması uyumluluk faktörü $s = \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\alpha T}$, ile gösterilen bir parameter ile belirlenir. Katman yapısında kullanılacak iki farklı bileşik için uyumluluk faktörü değerinin ikiden daha büyük olmaması istenir. Uyumluluk faktörü (*s*) tarafından verilen bağıl akım yoğunluğu $u = \frac{J}{k\,\nabla T}$ ile gösterilir (Snyder, 2004). Snyder ve diğerleri katmanlı yapıda kullanılan TE malzemelerin bağıl akım yoğunuluğunun eşit olduğu durumda maksimum verimin gerçekleştiğini göstermiştir. Katmanlı modül yapısında genellikle düşük sıcaklık gereksinimi olan TE malzemeler soğuk tarafa, yüksek sıcaklık gereksinimi olan TE malzemeler ise sıcak tarafa gelecek şekilde katmanlı olarak yerleştirilir. Bu tez çalışmasında, literatürden farklı olarak ilk kez tellür bazlı TE bileşikleri (*n*-tipi Bi_2Te_3 ve *p*-tipi Sb_2Te_3) ve $CoSb_3$ bazlı Skutterudite (*n*-tipi $Ba_{0.1}Yb_{0.2}Fe_{0.1}Co_{3.9}Sb_{12}$ ve *p*-tipi $Ce_{0.5}Yb_{0.5}Fe_{3.25}Co_{0.75}Sb_{12}$) bileşiklerinin gerçek fiziksel parametreleri kullanılarak katmanlı bir modül yapısı oluşturulmuş ve modülün performans analizi yapılmıştır. TE bileşikleri kullanılarak oluşturulan katmanlı modülün performans analizi yapılmıştır.

2.10.2. Thomson Etkisi ve Temas Direncinin Modül Performansı Üzerine Etkisinin Analiz Edilmesi

Thomson ısısı ve temas dirençleri bir TE modülün performansını olumsuz etkilediği, birçok araştırmacı tarafından doğrulanmıştır. Thomson ısısının etkisi, sıcaklık gradyanı küçük olduğunda ihmal edilebilir ancak sıcaklık gradyanından bağımsız olarak temas direncinin etkisi her zaman mevcuttur. Thomson etkisi modül tasarımcısı tarafından azaltılamaz, ancak TE modülünün geometrisinin optimize edilmesi ile arayüzeylerde düzgün bir temas sağlanabilir böylece temas direnci azaltılabilir. Böylece TE modülün geometrik optimizasyonu yapılarak, hem minimum TE malzemelerinin kullanımı hem de modülün yüksek performans göstermesi sağlanabilir. Tek veya çok parametreli geometrik optimizasyon, matematiksel optimizasyon

algoritmalarının yanı sıra analitik, sayısal yöntemler kullanılarak yapılabilir. Bir TE modülünün geometrisini optimize etmek için kullanılan optimizasyon yöntemlerinden bazıları genetik algoritma, parçacık sürüsü optimizasyonu, benzetimli tavlama, yapay arı kolonisi, karınca kolonisi optımızasyonu, COMSOL Multiphysics, ANSYS, Newton Raphson's yöntem vs. gibi saymak mümkündür. Meng ve ark. (2019), üç boyutlu çok fizikli bir modeli çok nesnel bir genetik algoritma (MOGA) ile birleştirerek katmanlı bir TE modelinin her aşaması üzerindeki sayı tahsisinin etkisini araştırmıştır. Ge ve ark. (2018), modülden maksimum çıkış gücü elde edilmesi için TE bacakların hacmi esas alınarak katmanlı TE modül optimizasyonu yapmıştır. Optimizasyonda MOGA ve sonlu eleman analizi (FEA) kullanılmıştır. Chen ve arkadaşlarınınkine benzer başka bir çalışmada (2018), 313 K sabit sıcaklık gradyanı ile çıkış gücünün ve enerji dönüşüm verimliliğinin sırasıyla %51,9 ve %5,4 oranında arttığı bulmuştur. Yusuf ve ark. (2021a), nesnel işlevin çıkış gücü olduğu bir TE modülün geometrisini optimize etmek için genetik algoritma (GA) kullanmıştır. Optimizasyonda hem temas direnci hem de Thomson etkisi göz önünde bulundurulmaktadır. Analizlerde 500 K sıcaklık gradyanının oluşturulması ile, maksimum 30,1 W çıkış gücü ve %9,87 maksimum enerji verimliliği sağlanmıştır. Ayrıca, analizlerde temas dirençleri hariç tutularak, maksimum çıkış gücü ve enerji dönüşüm verimliliği sırasıyla %19,4 ve %11,65 oranında artış sağladığı görülmüştür. Aynı şekilde, sadece Thomson etkisi hariç tutularak, yapılan analizlerde ise maksimum çıkış gücü ve enerji dönüşüm verimliliği sırasıyla %2,66 ve %5,67 oranında fazla olabildiği görülmüştür. Lee ve ark. (2020), farklı bacak geometrilerine, TE malzemelerine, katmana sahip, TE modüllerinin performansını araştırmak için sayısal bir yöntem kullanmışlardır. Tek kademeli silindirik bacak geometrisinin diğer konfigürasyonlardan daha üstün olduğunu bulmuşlardır. Aljaghtham ve Çelik (2021), hem düz hem de tekgen konfigürasyonlar için tekli bir TE modülü tasarlamışlardır. Tekli TE modülde, sadece tek bir bacak çifti yeterlidir, bu nedenle gelişmiş bir performans gözlemlemek mümkündür.

TE modüllerinin çalışmasında yukarıda belirtilen fiziksel olayların dışında mekanik stabilite de eşit derecede önemlidir. Zira TE modüllerin çalışması sırasında termal ve mekanik gerilme oluşur. Erturun ve ark. (2014), TE modüllerin çeşitli bacak geometrilerini sayısal olarak analiz etmiş ve çalışmalarında bacaklardaki termal gerginliğin büyüklüğünün ve dağılımının büyük ölçüde değiştiğini ortaya koymuştur. Sayısal analizler yoluyla, Ming ve ark. (2017), yatay yöndeki termal gerginliğin katmanlı bir TE modülün performansını güçlü bir şekilde etkilediğini tespit etmişlerdir. Benzer sayısal analizler kullanarak, Wu ve ark. (2014), yüksek ısı akışı altında oluşan yüksek termal gerginliğin bir TE modülün ömrünü kısaltabileceğini

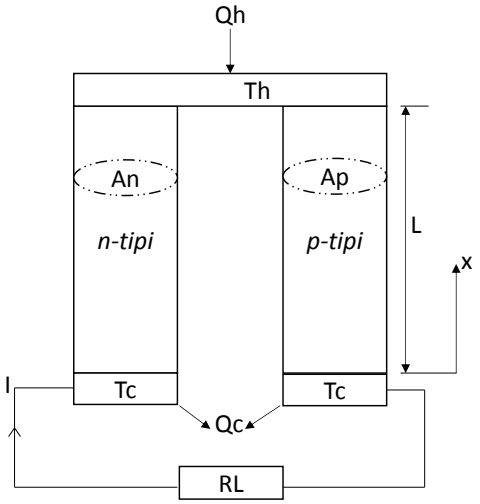
belirlemiştir. TE modüllerin çeşitli geometrilerinin termomekanik davranışları hem sayısal hem de deneysel olarak analiz edilmiştir (Bakhtiaryfard ve Chen, 2015), toplam sapmanın ve maksimum gerginliğin dikdörtgen düzene kıyasla dairesel bir düzende azaldığı ve bu nedenle TE modülün yaşam döngüsünün artırabileceği Bakhtiaryfard ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ortaya konulmuştur. Fan ve Gao (2018), tek bir TE modülün geometrisini ve bacak sayısını sayısal olarak optimize etmiştir. Çalışmada, optimum TE performansının optimum sayıda bacakla elde edildiği, ancak maksimum von Mises gerginliği'nin bacakların sayısına bağlı olmadığı ortaya koyulmuştur.

Benzer şekilde, Thomson etkisinin termoelektrik modülün çıkış performansı üzerindeki etkisi geniş çapta araştırılmıştır. Chen ve ark. (1996b) Thomson etkisinin dahil edilmesiyle maksimum güç çıkışı ve maksimum enerji dönüşüm verimliliği analiz edilmiştir. Arora ve Arora (2018), Thomson etkisinin de dahil olmak üzere tek ve iki aşamalı (seri/paralel) termoelektrik jeneratörlerin çok kriterli optimizasyonuna dayalı kapsamlı karşılaştırmalı analizler gerçekleştirmiştir. Pang ve Zhang (2020), Thomson etkisini dikkate alarak dairesel termoelektrik jeneratörü analiz etti; modülün güç çıkışı ve enerji dönüşüm verimliliğinin Thomson etkisinden olumsuz etkilendiğini ve çıkış performansının doğru bir şekilde tahmin edilmesi için her zaman analize dahil edilmesi gerektiği rapor edilmiştir. Kalteh ve Garmejani (2019), Bi-Te ve Pb-Te olmak üzere iki termoelektrik malzeme alaşımı üzerinde Thomson etkisi incelenmiştir; 650 K'nin altındaki sıcaklıklarda Thomson etkisinin alaşımların çıkış performansı üzerinde olumsuz etkisi olduğu ve Bi-Te nin Pb-Te bileşik grubuna göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Analizlerinde, diğer durumun aksine 650 K'den daha yüksek sıcaklıklarda Thomson etkisinin , Pb-Te'nin çıkış performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur. Suarez ve ark. (2020) Thomson etkisinin düşük sıcaklık gradyanında çalışan yüksek Seebeck katsayılı bir termoelektrik modül üzerinde olumsuz, yüksek sıcaklık gradyanında çalışan düşük Seebeck katsayılı bir modül üzerinde olumlu etkisi olduğu bulunmuştur. Fraisse ve ark. (2013) basitleştirilmiş bir modeli (Thomson etkisi olmadan) ANSYS yazılımı kullanılarak elde edilen sonlu elemanlar yöntemi modeliyle (Thomson etkisi ile) ve elektrik analoji modeliyle (Thomson etkisi ile) karşılaştırılmıştır. Seebeck katsayısının sabit alındığı herhangi bir model için Thomson etkisinin analize dahil edilmemesi gerektiği ve elektrik analoji modelinin sonlu elemanlar yönteminden çok daha hızlı ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlara çok yakın sonuçlar verdiği bulunmuştur.

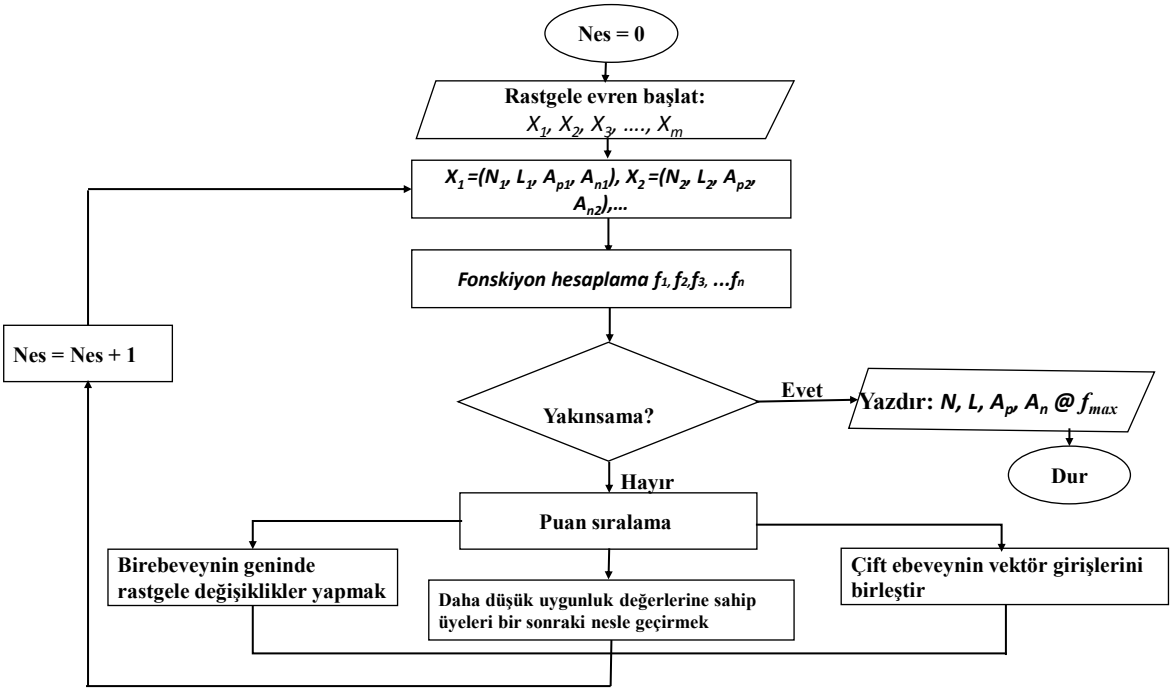
Yukarıda kısaca özetlendiği üzere bir TEJ in geometrik optimizasyonu (bacak yapısı, geometrisi ve performansı etkileyen temas direnci ve Thomson etkisi gibi) üzerine Genetik Algoritma (GA) esaslı kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu çalışmalarda ağırlıklı olarak, termoelektrik bacaklardaki malzemenin özellikleri sabit kabul edilmiş (ideal koşullar), sıcaklığa bağlı katsayıların değerleri iki tarafının ortalama sıcaklığından hesaplandığı varsayılmış, temas dirençlerinin etkisi veya Thomson etkisi genel olarak ihmal edilmiştir. Yine çalışmalarda basitleştirme olması açısından tüm modül yerine bir çift TE bacak üzerinden oluşturulan modül üzerinden analizler yapılmıştır. Ayrıca ek olarak, bazı çalışmalarda, n-tipi ve p-tipi TE bacakların kesit alanının eşit olduğu, dolayısıyla optimizasyon algoritmasının serbestlik derecesini azalttığı varsayılarak analizler yapılmıştır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada literatürden farklı olarak, TEJ ün kapsamlı analizinde yukarıda belirtilen tüm hususlar dikkate alınmış çok parametreli geometrik optimizasyonu kullanılmıştır. Burada termoelektrik malzemelerin sıcaklığa bağlı özellikleri (tam denklemler) dikkate alınarak GA temelli analiz yöntemi kullanılmıştır. Temas dirençlerinin ve Thomson etkisinin modülün çıkış performansına etkisi daha gerçekçi bir sonuçla belirlenmiş ve sonuçlar deneysel ve sayısal verilerle doğrulanmıştır. Çalışmada 500 K' ne kadar sıcaklık gradyanı oluşturularak uzunluk, alan ve TE çiftlerinin sayısı optimize edilmiştir. Şekil 2.4'de optimize edilen parametreler görülmektedir. Analizlerde kullanılan sınır şartlar aşağıda ki gibidir**:**

- $1 \leq N \leq 60$
- $1\ \text{mm}^2 \leq A_p \leq 9\ \text{mm}^2$
- $1\ \text{mm}^2 \leq A_n \leq 9\ \text{mm}^2$
- $1\ \text{mm} \leq L \leq 4\ \text{mm}$

Kullandığı genetic algoritma şekil 2.5'de gösterildi.



Şekil 2.4: Optimize edilen TE modül (Yusuf ve ark., 2021a).



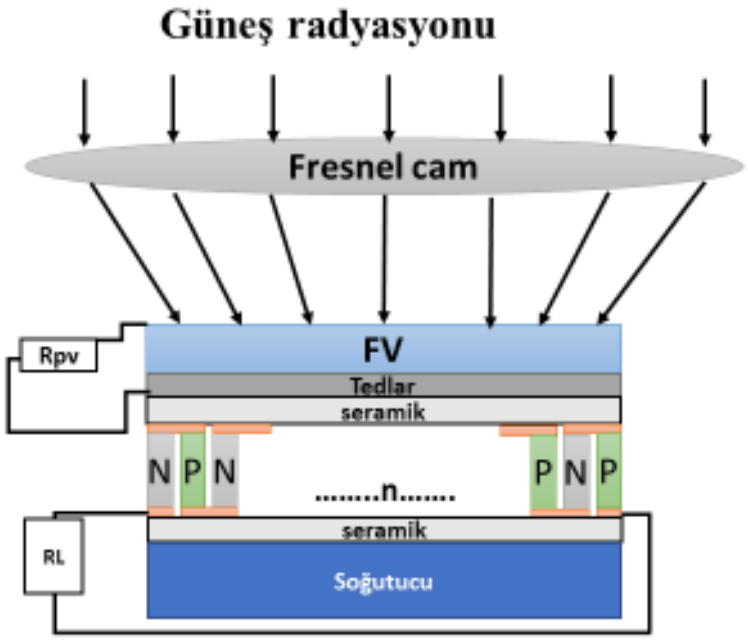
Şekil 2.5: Kullanılan Genetik Algoritma yapısı (Yusuf ve ark., 2021a).

2.10.3. Konsentre Fotovoltaik-Termoelektrik Modül Hibrit Enerji Üretecinin Çoklu Genetik Algoritma Yöntemi ile Performans Analizi

Kullanılan konvansiyonel enerji kaynaklarının (fosil yakıtlar) çıkarılmaları ve işlenmelerinin maliyetli olmasının yanısıra, yenilenebilir olmamaları ve çevreye ve doğaya verdiği zararlar küresel ısınmanında önemli nedenlerinden biridir (Höök ve Tang, 2013). Küresel ısınmanın etkisini azaltmak için bu geleneksel enerji kaynaklarının düşük maliyetli, yenilenebilir ve

sürdürülebilir enerji kaynakları ile değiştirilmesi gerekmektedir. Her gün, güneşten dünyaya büyük miktarda enerji salınmaktadır. Bu enerji maliyetsiz yenilenebilir ve çevre dostudur, dolayısıyla verimli bir şekilde kullanılırsa, büyük ölçüde fosil yakıtların yerini alabilecek potansiyele sahiptir. Yarı iletken fotovoltaik (FV) hücreler, güneş ışınımını elektrik enerjisine doğrudan dönüştürmektedir. Tipik bir tek bağlantılı silikon FV hücresi, 1000 W/m^2 güneş ışınımına sahip 1 cm^2'lik alanda 0,6 V'luk bir açık devre gerilimi ve 30 mA'ya kadar kısa devre akımı üretebilir (Duffie ve ark., 2020); daha yüksek çıkış gerilim ve akımı gerektiğinde, FV hücreleri seri ve paralel olarak bağlanması ile elde edilir. FV hücrelerinin düşük güç çıkış gücü ve dönüştürme verimliliği nedeniyle, yüksek güç elde etmek için birçok FV modülünü bir araya getirmek gerekir ki buda geniş yüzey alanları gerektirmektedir. Son zamanlarda, geleneksel FV sistemlerinin yerine güneş ışınımını alan ve onu küçük bir FV yüzey alanına yoğunlaştıran konsantre FV (KFV) sistemlertercih edilmektedir. KFV sisteminin geleneksel FV sistemine göre avantajları şunlardır: yüksek çıkış güç üretimi, daha küçük kurulum alanına ihtiyaç duyma ve daha az sayıda modül kullanılmasından dolayı düşük maliyetli olmasıdır. KFV sisteminin güç çıkışındaki bir artış, yoğunlaşma oranına ve FV modülünün arka tarafında kullanılan bir soğutma sistemine bağlıdır. Bir KFV sisteminde, FV hücrelerinin yüzeyine çarpan güneş ışınımı yoğunluğunun artması nedeniyle FV hücrelerinin yüzeyinde yüksek bir sıcaklık gözlemlenebilir. Güneş ışığının sadece bir kısmı FV hücreleri tarafından emililirken, diğer kısmı ise kayıp termal enerjiye dönüşmekte ve FV hücrelerinin ısınmasına neden olmaktadır. Aşırı sıcaklık sistemden uzaklaştırılmalıdır, aksi takdirde her 1 °C'lik sıcaklık artışında çıkış gücü %0,45 oranında düşmektedir. Benzer şekilde dönüştürme verimliliği de düşmektedir (Teffah ve Zhang, 2017).

KFV sistemindeki aşırı ısınmayı kontrol etmenin etkili yollarından biri, ısıyı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürecek bir mekanizma yani bir termoelektrik jeneratör kullanmaktır. Şekil 2.6'de bu çalışmada kullanılan kombine sistem, konsantre fotovoltaik-termoelektrik hibrit sistem (KFV-TE) tasarımı görülmektedir.



Şekil 2.6: Konsentre Fotovoltaik-Termoelektrik hibrit sistemi (Yusuf ve ark., 2021b).

FV-TE/KFV-TE hibrit sistemlerin farklı konfigürasyonlarının yanı sıra sistemin performansına ilişkin literatürde farklı analizler yapılmıştır. Yin ve ark. (2018) konsantre güneş spektrumu tekniğini kullanarak bir FV-TE sistemini optimize etmiş; sistemin en yüksek verimi, sistemin optimum çalışma sıcaklığından ve spektral ayırıcının optimum kesme dalga boyuna ulaştığında elde edildiği görülmüştür. Abdo ve ark. (2019) bir KFV-TE sisteminin yeni bir konfigürasyonunu sayısal olarak araştırdıklarında, TE modülünün doğrudan sistemin arka yüzeyine bağlandığı geleneksel tasarıma kıyasla KFV sisteminin daha yüksek bir yoğunlaşma oranında ve daha düşük bir ortalama hücre sıcaklığında çalışabileceğini göstermişlerdir. Rezania ve Rosendahl (2017), geniş bir yoğunlaşma oranı varyasyonunu göz önünde bulundurarak ve farklı tipte soğutucular kullanarak bir KFV-TE sistemi üzerinde fizibilite çalışmaları yürütmüştür. Skjølstrup ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada bir FV-TE sisteminde bir yoğunlaştırıcının eklenmesiyle oluşan FV modüllerin yüzeyinde oluşan aşırı sıcaklık, bir spektral ışın ayırıcının kullanılmasıyla azaltılabildiği ve uygun bir tasarım ile sistemin dönüşüm verimliliğinin artırılabildiği vurgulanmıştır (Skjølstrup ve Søndergaard, 2016). Mahmoudinezhad ve ark. (2018) değişken güneş ışınımı altında hibrit bir KFV-TE sisteminin davranışı araştırılmıştır. TE modülün ve KFV'nin verimlerinin, PV modülünün sıcaklığının ve güneş ışınımının değişimine duyarlı olduğu görülmüştür. Güneş radyasyonun günün saatlerine göre hızla değişmesinden dolayı termal temas direncindeki artışla çıkış performansı düşmektedir. TEJ ile sistemin sıcaklık değişimi stabilize edilebilmektedir. Gu ve

ark. (2019), KFV-TE sistemini güneşli ve bulutlu hava koşullarında FV sistemi referans alarak değerlendirmiştir. KFV-TE sistemi, tek başına FV sistemine göre %1,24 - %2,85 daha yüksek elektrik gücü ürettiği görülmüştür. Ayrıca, hibrit bir KFV-TE sisteminde ısı toplayıcının termal direncinin sistemin performansında baskın bir parametre olduğu görülmüştür. Zhang ve Xuan (Zhang and Xuan, 2016) , termal direncin azaltılabileceğini ve FV ile TEJ arasına bir bakır plaka yerleştirilerek TEJ'nin sıcak tarafında homojen sıcaklık dağılımının sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca FV modül alanının azaltılmasının hibrit sistemin verimliliğini artırabileceğini ancak termal direnci arttıran bu ikisi arasında bir denge bulunması gerektiğini belirtmişlerdir.

Birçok araştırmacı, yüksek çıkış performansı için KFV-TE sisteminin parametrelerini optimize etmiş olsa da, optimizasyonlar çoğunlukla tek bir parametre güneş konsantrasyon oranı (Yin ve ark., 2019) veya iki parametre TE modülünün yük direnci ve termoelement uzunluk/konsantrasyon oranı üzerinde yoğunlaşmıştır (Lamba ve Kaushik, 2018). KFV-TE sisteminin performansı, konsantrasyon oranı, güneş ışınımı, ortam sıcaklığı, rüzgar hızı, TE modüldeki bacak sayısı, alanı ve uzunluğu, TE modülünün yük direnci, termal temas direnci ve soğutucu gibi birçok parametreye doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, bir veya iki parametreyi optimize etmek, sistemin optimum performansını belirlemekte yeterli olmayacaktır. Bunun nedeni, diğer parametrelerin optimum değerlerinde çalıştırılamamasıdır. Bu nedenle, sistemin uygun değer performansını elde etmek için birçok parametrenin aynı anda optimize edilmesi gerekir. Birçok araştırmacı tarafından geniş çapta araştırılan KFV'nin güç çıkış denklemi (modeli), maksimum güç noktasından uzakta ele alınmış ve model, ya doğrudan FV hücrelerinin I - V karakteristik denklemlerinden (Lin ve ark., 2015) ya da FV hücrelerinin enerji dönüşüm verimliliği (Li ve ark., 2017) baz alınarak türetilmiştir. Bu nedenle, iki cihaz (KFV ve TE modülü) normal güç çıkışında ve maksimum güç noktasında çalıştığında KFV-TE sisteminin çıkış performansının araştırılmasına ihtiyaç vardır. Ayrıca, bu tür hibrit sistemlerde TE modülünün Thomson ısısı (Soltani ve ark., 2018) ve temas direnci (Li ve ark., 2019) analizlerde çoğunlukla göz ardı edilmektedir. Bu varsayımlar, KFV-TE sistemindeki TE modülünün performansının yanlış hesaplanmasına ve olduğundan yüksek değer vermesine neden olmaktadır. Buda deneysel sonuçlar ile teorik sonuçların örtüşmemesine neden olmaktadır.

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen literatürde mevcut boşluklar giderilerek Thomson'ın ısısı ve TE modülünün temas direnci tüm analizlere dahil edilmiştir. Çalışmada TE modülün Thomson ısısı ve temas direncini içeren yeni denklemler türetilmiş KFV-TE sisteminin maksimum güç

noktasında ve maksimum güç noktasından uzakta çalışmasını karakterize eden dört model önerilmiştir. Sistemin optimum performansını elde etmekte baskın olmayan sıralama genetik algoritması (NSGA II) kullanılmış, modellerin çok parametreli optimizasyonunu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, KFV-TE sisteminin işleyişine ilişkin modellerin analizi ve yorumlanması, nihayetinde TEJ'nin KFV-TE sisteminde optimum performans koşulunun belirlenmesi sağlanmıştır.

2.10.4. Maksimum Güç Çıkışı için Konsantre Fotovoltaik-Termoelekrik Hibrit Sistemlerde Termal Direnç Analizi

Son birkaç yılda, yoğunlaştırılmış fotovoltaik - termoelektrik sistemler (KFV-TE), elektrik enerjisi üretiminde güneşin geniş bir ışıma spektrumunu enerjiye dönüştürebilme yetenekleri nedeniyle daha fazla dikkat çekmiştir. Optimum güneş spektrumu, farklı fotovoltaik hücreler (FV) için önemli ölçüde değişmekte olup, genel olarak 349 – 949 nm aralığına denk gelmektedir. Termoelektrik jeneratör (TEJ) ise güneş spektrumunun 949 – 2500 nm aralığındaki spektrumunu kullanmaktadır (Kraemer ve ark., 2008). Deneysel araştırmalar (Yin ve ark., 2019), KFV-TE sisteminin performansının bağımsız bir KFV sisteminden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni sistemde çalışan TEJ'in sağladığı ek elektrik enerjisidir. Sistemde çalışan TEJ'nin katkısı genellikle FV'ninkinden daha düşüktür, bu katkı TEJ'nin iki tarafı arasında büyük bir sıcaklık gradyanı korunarak arttırılabilir. Bunun için , bir güneş yoğunlaştırıcının kullanılması ve verimli bir soğutma yöntemi sağlanması gerekir (Wu Ve ark., 2015). FV ve TEJ'nin termal olarak seri olduğu doğrudan bir ısısal bağlantı için, FV'nin yüzey sıcaklığındaki artışla TEJ'nin sıcak tarafının sıcaklığı artarmaktır. Bu, FV'nin yüksek sıcaklığında TEJ tarafından daha fazla enerjinin emileceği ve dolayısıyla TEJ'in performansının iyileştirilebileceği anlamına gelir. Ancak, FV sıcaklığının artmasıyla sistemin çıkış gücü enerji verimliliği azalmakta ve FV'nin ömrünü kısaltmaktadır (Dallan ve ark., 2015). Bu çelişkili çalışma koşulları, sistemi biraz karmaşık hale getirmekte ve birçok araştırmacıyı tüm sistem için en uygun çalışma koşullarını bulma konusunda araştırmalara teşvik etmektedir. Bu çalışmalar içerisinde bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Shittu ve ark. (2020), FKV-TE sisteminde dört termal temas direncinin etkisini araştırdı. Sonuçlar, tüm temas dirençleri dahil edilmediğinde, sistemin çıkış gücünün ve enerji verimliliğinin sırasıyla %7,6 ve %7,4 oranında fazla tahmin edildiğini göstermiştir. Başka bir çalışmada, Shittu ve ark. (2019) bir TE çiftinin dış geometrisinin bir FV-TE sisteminin maksimum verimliliği üzerindeki etkisini inceledi. Çalışmada, TE çiftinin genel verimliliği ve sıcaklık gradyanının, TE bacaklarının alanı ve uzunluğundaki artışla azaldığı ortaya

koyulmuştur. Bir TE modülün, iç direnci yük direncine eşit olduğunda maksimum çıkış gücüne ulaştığı bilinmektedir. Ancak, bir FV – TE sisteminde çalışan bir TE modülün optimum yük direnci, TE modülün tek başına çalıştığı zamandan farklıdır (Li ve ark., 2018). FV - TE sisteminde çalışan bir TE modülünün optimum yük direnci, iç direncinden daha azdır.

Doğrudan termal bağlantı, bir KFV - TE sisteminin en çok araştırılan konfigürasyonudur. Bunun nedeni basitliği, kurulumu daha kolay, nispeten düşük maliyetli ve kanıtlanmış performansıdır. Doğrudan bir termal bağlantıda, FV'nin yüzey alanı TE modülünkinden farklı olduğunda, iki alt sistem arasına sıkıştırılmış dikdörtgen prizma bakır levha, TE modülünün sıcak tarafında eşit sıcaklık dağılımı sağlar (Zhang ve Xuan, 2016). Ancak, TE modüle kıyasla FV'nin yüzey alanının boyutuna bağlı olarak, bakır levhanın üst veya alt yüzeyinde ısı kayıpları meydana gelmektedir. Beeri ve ark. (2015) FV - TE sisteminde sıcak ve soğuk taraf içi ayrı ayrı bakır bloklar kullanıldı. Isı, sıcak taraftaki bakır blok aracılığıyla TE modüle aktarılırken, soğuk taraftaki bakır blok bir soğutucu görevi görmektedir. Ancak FV in, sıcak taraf bakır blok ve TE modülün yüzey alanları farklı olduğunda önemli bir ısı kaybı oluşur. Bu da TE modülün performansını düşürmektedir. Bu kayıpları en aza indirmenin yollarından biri FV-TE sisteminde kullanılan dikdörtgen prizma bakır levhanın, temas dışında kalan yüzeylerinin yalıtılmasıdır (Rodrigo ve ark., 2019; Zhang ve Xuan, 2017). Doğrudan bir termal kuplaj sisteminin performansını iyileştirmeye yönelik bir başka girişimde ise, hem TE modüle temas eden dikdörtgen prizma bakır levhası, hemde modülün dış yüzeyindeki seramik levha yok varsayılmış ve TE modülün bakır elektrotları (terminal kabloları), bir yalıtım tabakası yoluyla doğrudan FV'ye bağlanmıştır (Zhang ve Xuan, 2019). Bu tasarımın tek-çiftten oluşan bir prototip üretimi için umut verici olsa da, tasarımda FV, bakır elektrot, iki bakır elektrot arasında bir konektör ve her bir termo eleman için bir ısı emici gerektirdiğinden pratik olarak yapılması teknik sorunlar içermektedir. Böyle bir tasarımı büyük ölçekli olarak gerçekleştirmek istediğimizde sistemin boyutunu ve maliyetini önemli oranda artıracaktır. Üst ve alt seramik plakaların termoelemanlara mekanik ve termal destek sağladığı, veısı transferini arttırmak amacıyla bunları ortadan kaldırılmasının da TE modülün ömrünün kısaltabileceği unutulmamalıdır.

Yukarıda verilen literatür çalışmalarından; bir FV - TE sisteminin doğrudan termal kuplajının, ya bakır levhanın yüzeyinde bir yalıtım malzemesinin bulunmamasından dolayı çevreye ısı kaybından ya da fazla bakır ve yalıtım malzemelerinin kullanımından kaynaklı ısı kaybından muzdarip olduğu sonucuna varılabilir. Bu nedenle FV-TE den oluşan bir hibrit sistemde FV'nin arka tarafından ısıyı, TE modüle verimli bir şekilde aktarmak oldukça önemlidir. Bu çalışmada,

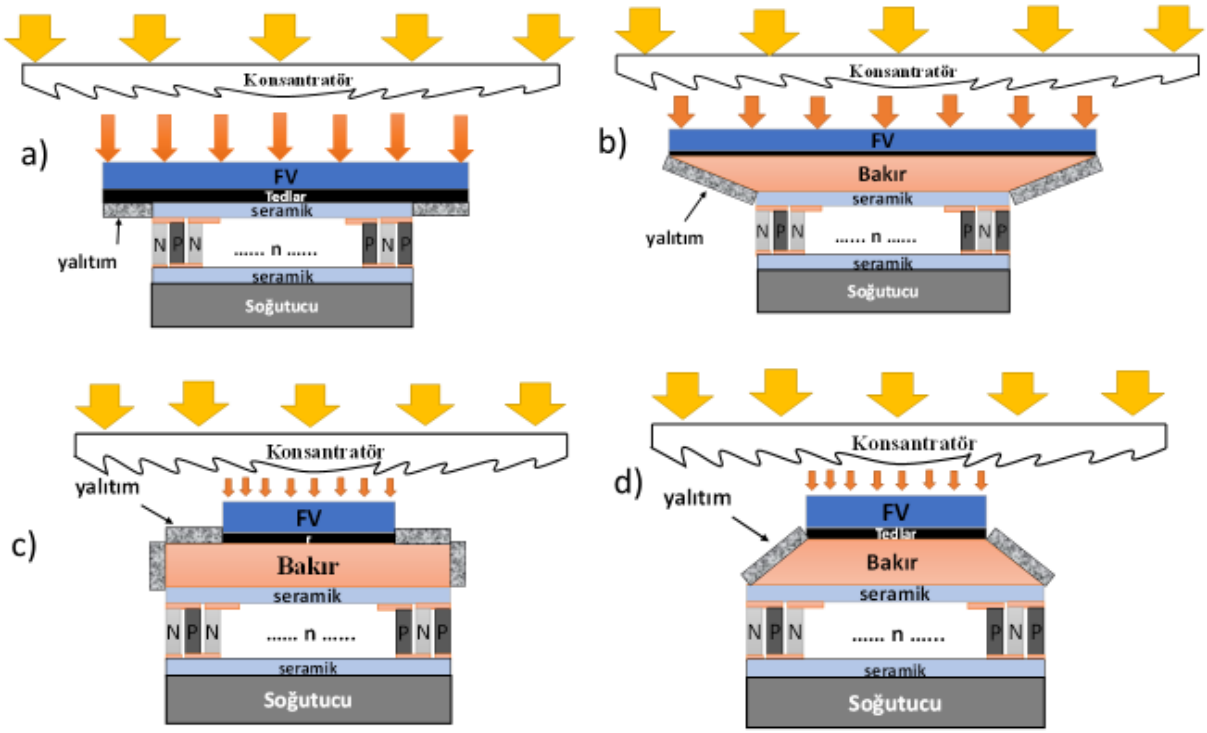
yukarıdaki problemler ele alınmış ve FV-TE sisteminde maksimum güç elde etmek için optimizasyonlar yapılmıştır. Çalışmada,

- Konvensiyonel dikdörtgen prizma bakır levhanın yerine yeni bir trapez (yamuk) bakır levha yer almıştır.
- Tek boyutlu termal direnç analizi yoluyla, KFV-TE'nin dört konfigürasyonunun matematiksel modelleri türetilmiştir.
- İki yeni modelin performansları, Thomson etkisi, termal macun ve termoelement uzunluklarının değişimi dikkate alınarak konvansiyonel modellerle karşılaştırılmıştır.

Yeni yamuk KFV-TE sisteminde, yamuk bakır levhanın üst ve alt yüzey alanları sırasıyla FV ve TEJ'nin yüzey alanlarıyla birebir eşleşmektedir. Böylece yüzeysel kayıp yaşanmadan FV'den TE modülüne ısı transferi iyileştirilmiştir. Tek bir trapez bakır levhanın üretim maliyeti, dikdörtgen prizma bakır levhanın üretim maliyetinden daha yüksek olmasına rağmen, ancak büyük ölçekli bir üretim için, trapez bakır levha kullanımından elde edilen yalıtım ve bakır malzeme tasarrufu, ek maliyet artışından daha ağır basmaktadır. Böylece, yeni trapez biçimli bakır levha geleneksel bakır levhaya göre avantajlıdır. Öyle ki FV'den TE modülüne ısı transferi arttığı gibi büyük ölçekli bir üretim durumunda kullanılacak bakır ve yalıtım malzemeleri de önemli oranda azaltılmış olacaktır.

Çalışmada dört farklı KFV-TE konfigürasyonu kullanılmıştır. KFV-TE sisteminin ana bileşenleri, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi yoğunlaştırıcı, FV, TE modül ve soğutucudan oluşmaktadır. Dört farklı durumdan, Şekil 2.7a) 1.Durumu göstermektedir. Yani FV yüzey alanının TEJ'in yüzey alanından büyük olduğu ve aralarında metal (bakır) ısı tranferi elemanının olmadığı, sadece dışarda kalan yüzeyler için yalıtım malzemesinin kullanıldığı durumdur. FV hücresinin yüzey alanının TEJ'ninkinden daha büyük olduğu 2. durum Şekil 2.7b) de gösterildiği gibidir. Burada TE modül ve FV hücre arasında ısı transferi sağlayan yamuk (trapez) bakır levha bulunmakta ve bakır levhanın temas dışında kalan yüzey alanları için yalıtım malzemesi bulunmaktadır. Analizde kullanulan 3. konfigürasyon ise, TEJ'nin yüzey alanı FV'ninkinden daha büyüktür (Şekil 2.7c)). Burada ise TEJ ve FV hücre arasında ısı iletiminde diktörgen prizma bakır levha kullanılmakta ve TEJ ile FV arasında temas dışında kalan yüzeylerde ısı yalıtım malzemesi kullanılmaktadır. Son konfigürasyon yani 4. durumda (Şekil 2.7d)) ise TEJ yüzey alanı FV hücre yüzey alanında büyük ve ısı iletiminde yamuk (trapez) bakır metal kullanılmaktadır. Burada da temas dışında kalan yüzeylerde yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Analizlerde TEJ ve FV hücre yüzeyleri arasındaki termal temas direncini azaltmak için, FV ve TEJ, FV ve bakır plaka, bakır plaka ve TEJ, TEJ ve soğutucu

arasındaki arayüzeylerde termal macun eklenmiştir. Analiz sonuçları "Bulgular" bölümünde tartışılmıştır.



Şekil 2.7: Farklı KFV-TE konfigurasyon (Yusuf ve Ballikaya, 2021).

2.10.5. Esnek Ve Rijit Termoelektrik Modüllerde Doldurma Malzemesinin Modül Performansı Üzerine Etkisinin Deneysel ve Teorik Analizi

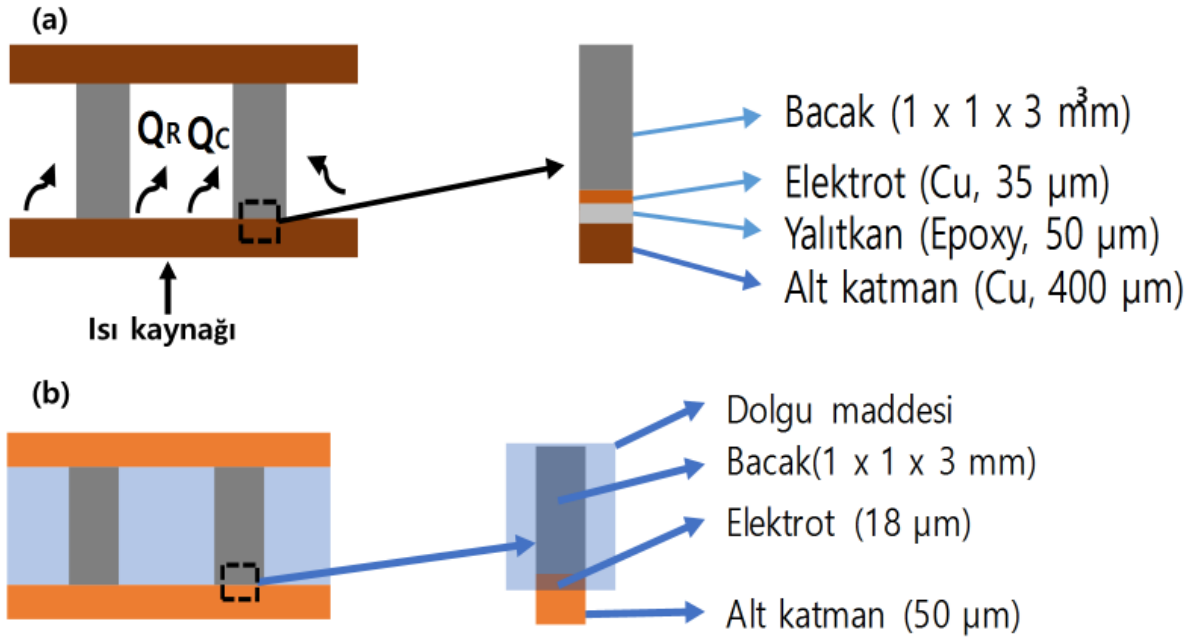
TEJ lerin enerji üretiminde kullanılan ısı kaynakları her zaman düz değildir. Bu nedenle kavisli ısı kaynaklarından gelen ısı enerjisinin birim yüzeye düşen miktarını artırmak için bükülebilir esnek TE modülleri kullanmak daha avantajlıdır. Esnek-TEJ'ler (E-TEJ'ler) organik TE malzemeleri, inorganik TE malzemeleri veya ikisinin bir kombinasyonundan oluşabilmektedir. Organik E-TEJ'ler mükemmel esnekliğe sahiptir, inorganik E-TEJ'lere kıyasla daha az termal gerilme içerirler. Ancak buna karşın inorganik E-TEJ'ler, organik E-TEJ'lere kıyasla daha üstün performans sergilerler. Giyilebilen elektronik uygulamalar için enerji kazanımındaki potansiyelleri nedeniyle, E-TEJ'ler son yıllarda giderek artan bir ilgi çekmeye başlamıştır. Aynı şekilde, E-TEJ'ler düzlem içi veya çapraz düzlem biçiminde geliştirilebilmektedir. Düzlem içi E-TEJ'lerdeki TE bacaklar alt tabakaya paralel iken, çapraz düzlemli E-TEJ'ler için bacaklar alt tabakaya diktir. Rojas ve diğerleri (2017), mikro cihaz üretimi için mikro üretim tekniklerini kullanarak kağıt altlıklar üzerinde son derece esnek düzlem içi TE modüller geliştirmiştir. Ekstra pürüzsüz ve yırtılmayan polimer kağıt kullanıldığında geliştirilen E-TEJ'in

performansının arttığı gözlenmiştir. Brus ve ark. (2018), bir ofis kağıdında fırça boyalı poli (3,4-etilendioxythiophene) polistiren sülfonat (PEDOT:PSS) filmleri ve kalemle çizilmiş grafit kullanarak basit, düşük maliyetli ve çevreye duyarlı bir E-TEJ geliştirmiştir. Çalışmada, TE bacaklar InSe ile bağlantıları yapıldığında E-TEG'in performansının arttığı gözlenmiştir. Park ve diğerleri (2016) moleküler Sb_2Te_3 chalcogenidometalate bazlı özel bir bağlayıcıyı kullanarak Bi_2Te_3 bazlı TE boya sentezlemiştir. TEJ, kavisli bir yüzeye fırçayla boyandığında 4 $mWcm^{-2}$ güç yoğunluğu üretmiştir. Çalışmalarında, Zhao ve ark. (2019), 1000 bükme döngüsünden sonra ve 35 K sıcaklık gradyanında, 10 termo çiftten oluşan kağıt tabanlı bir E-TEJ'in yaklaşık 8,3 mV çıkış gerilimnı ve yaklaşık 10 nW çıkış gücünü sağladığını göstermiştir. Lu ve diğerleri (2016), Bi_2Te_3 ve Sb_2Te_3 TE bacaklarından E-TEJ üretimini ipek kumaş malzeme üzerine entegrasyonu ile ürettiler. Geliştirilen ipek kumaş tabanlı bu E-TEJ, 35 K sıcaklık farkında yaklaşık 15 nW maksimum çıkış gücü üretmiştir. Mytafides ve ark. (2021) esnek bir karbon nanotüp (CNT) TE modülü geliştirdi ve 300 K sıcaklık gradyanında 461 μW maksimum çıkış gücü üretti. Liu ve diğerleri (2018) *p* tipi PEDOT:PSS fiber ve karbon nanotüp fiberden oluşan bir E-TEG imal etmiştir. Yaklaşık 60 K sıcaklık gradyanlı 481,2 μWcm^{-2} maksimum güç yoğunluğu elde edildi. Sürekli enerji hasadını sağlamak için, kendi kendini iyileştiren, son derece esneyebilen E-TEJ'ler geliştirilmiş ve iyi performansa sahip olduğu bulunmuştur (Liu ve ark., 2021; Ren vd., 2021; Xu ve ark., 2021).

Qu ve ark. (2018), esnek ve insan vücudundan enerji kazanımı için uygun bir çapraz düzlem sıcaklık gradyanı E-TEJ'i başarıyla geliştirmiştir. Wang ve diğerleri (2021), 10 dikey aerojel termokupldan oluşan ilk hafif esneyebilen ve sıkıştırılabilir E-TEJ'leri üretmiştir. Bu modülde 50 K'lık bir sıcaklık gradyanı ile %50'lik bir gerinim kuvveti uygulanarak maksimum 30,73 mWm^{-2} güç yoğunluğu elde edildi. Kim ve diğerleri (2018) E-TEG'li polimer bazlı bir ısı emici (heat sink) geliştirmiştir. Isı emici hem esnek hem de hafif olduğu için yeni konfigürasyon giyilebilir uygulama için idealdir. Shi ve diğerleri. (2018a), E-TEJ ile birleştirilmiş bakır köpük ısı emicinin plaka-yüzgeçli ısı emici ile E-TEJ'den daha üstün olduğunu göstermiştir. Eom ve arkadaşları (2017) tarafından bilezik benzeri bir E-TEJ geliştirilmiştir, cihaz denek çalışırken 80 μW çıkış gücü üretti. Aynı şekilde Park ve arkadaşları (2019) tarafından geliştirilen saat kayışı şeklindeki E-TEJ, denek yürürken maksimum 93,72 μW çıkış gücü üretmiştir. Çapraz düzlem E-TEJ'leri ile ilişkili düşük esneklik sorunu, TE bacaklar basılı bir devre kartında (PCB) kullanılan esnek PCB ile özel boşluklar oluşturularak giderilmiştir (Shi ve ark., 2018b). Ayrıca, *p* tipi nanokompozit ve n tipi ticari TE malzemeleri kullanıldığında E-TEJ performansının ~7 kat artırıldığı bildirilmiştir (Nozariasbmarz vd., 2020). Doldurma malzemesi E-TEJ'e mekanik

destek sağlayabilmesine ve konveksiyon ve radyasyon kayıplarını azaltabilmesine karşın, dolgu malzemesi tarafından emilen enerji E-TEJ'in performansını azaltmaktadır. Jung ve arkadaşları (2021) doldurma malzemesinin kalınlığı azaltılarak E-TEJ'in performansının artırılabileceğini göstermiştir. Yusuf ve ark. (2021b) her biri farklı dolgu malzemelerine sahip üç E-TEJ geliştirmiştir. 10,8 °C sıcaklık gradyanında, TE bacaklar arasında bir hava doldurucu ile E-TEJ için maksimum 155 μWcm^{-2} güç yoğunluğu elde edilmiştir ve bu sonuç Polydimethylsiloxane (PDMS) ve Polyurethane (PU) formunun kullanıldığı sonuçlara göre çok daha yüksektir. Benzer sonuç Suarez ve ark. (2017), TE bacaklar arasındaki hava ile E-TEJ'in PDMS dolgulu E-TEJ ile karşılaştırıldığında daha yüksek performansa sahip olduğunu göstermişlerdir.

TE modüllerde birçok dolgu malzemesi kullanılmış olmasına rağmen, birçok dolgu malzemesinin TE modüllerinin performansı üzerindeki etkisini hem teorik hem de deneysel olarak belirleyen bir çalışma yoktur. Bu tez kapsamında diğer bir çalışmada dolgu malzemelerinin E-TEJ'in performansı üzerindeki etkisi teorik ve deneysel olarak detaylı şekilde incelenmiştir. TE modüllerin dolgu malzemelerinin etkisi 1 boyutlu ısı transfer modelleri, hem 3 boyutlu sonlu elemanlar hem de deneysel yöntemler kullanılarak türetilmiş ve doğrulanmıştır. Çalışmada yapılan bir başka işlem ise ısı kaynağı tipine göre performans karşılaştırmasıdır. Düz ve kavisli ısı kaynakları, TE modüller tarafından enerji hasadı için yaygın olarak kullanılan ısı kaynaklarıdır. Her iki durumda da bir TE modülün performansını belirlemek için toplu TE malzemelerinden oluşan rijit ve esnek TE modüller geliştirilmiştir. E-TEJ (E-TEJ), rijit TEJ (r-TEJ) ile karşılaştırıldığında daha düşük temas direnci ile sonuçlanan minimum bağlantılara sahip olacak şekilde geliştirilmiştir. Her durumda, dış kirleticilerden koruma sağlayan ve gerilimi azaltan dolgu malzemelerinin etkisi belirlenmiştir. Burada, r-TEJ'nin performansını artırmak için konvensiyonel seramik plakalar, ek soğutucu özelliklerine sahip bakır plakalarla değiştirilmiştir. Şekil 2.7 rijit ve esnek TEJ tek çift görülmektedir.



Şekil 2.8: Rijit ve esnek TEJ tek çift gösterildi (Yusuf ve ark., 2021c).

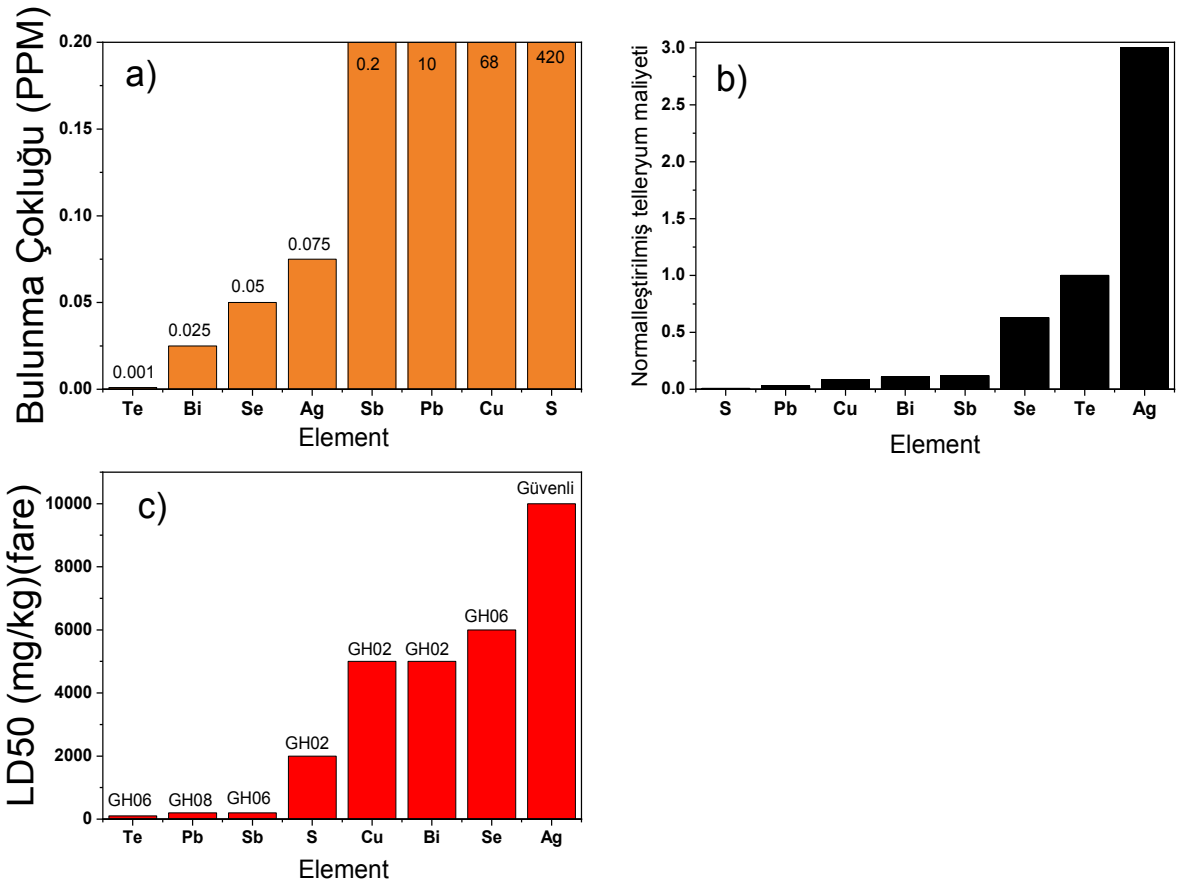
2.10.6. Düşük Maliyetli Modül Üretimi Mekanik, Maliyet ve Performans Analizi

Termoelektrik (TE) teknolojinin günümüzde pek çok stratejik uygulama alanları olsa da geniş ölçekli uygulama alanları henüz yaygınlaşmamıştır. Bunun önündeki engellerden biri TEJ lerin düşük dönüşüm verimliliğe sahip olmaları, bir diğer neden ise TE malzemelerinin maliyet-güç oranının, geleneksel enerji kaynaklarına göre daha yüksek olmasıdır (LeBlanc et al., 2014). Son yıllarda alternatif düşük maliyetli, yüksek performanslı TE malzemeleri bulma konusunda araştırma faaliyetlerinde önemli artış olmuştur (Fan ve ark., 2015; Ge ve ark., 2016; Mao ve ark., 2019, 2018; Wei ve ark., 2018). İçi boş dikdörtgen prizma şeklindeki TE ayaklara cam kumaş olan bir dolgu maddesi eklenerek TE malzemelerinin miktarının azaltılabileceğini deneysel olarak göstermiştir (Hwang ve ark., 2017). Benzer şekilde, delikli bir TE modülünün, geleneksel modüle göre daha düşük oranda TE malzemesine ve daha yüksek dönüştürme verimliliğine sahip olmasının yanı sıra mekanik olarak kararlı olduğu gösterilmiştir (Chetty ve ark., 2020). TE malzemelerinin bazı özellikleri doğada anizotropiktir, bu nedenle üç boyutlu bir analizin izotropik koşulun varsayıldığı tek boyutlu analizden daha doğru sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Ayrıca, bacaklardaki sıcaklık ve termal gerilim dağılımı, üç boyutlu grafikler kullanılarak görüntülenebilir ve analiz edilebilir. Birçok araştırmacı, TE cihazlarının termoelektrik ve/veya termomekanik performansını belirlemek için 3 boyutlu sayısal analiz yöntemi kullanılmıştır.

Birçok araştırmacı tarafından geniş çapta araştırılan, düşük sıcaklıkta çalışan tek kademeli termoelektrik modül, yalnızca iki TE malzemesinden (*n* – ve *p* – tipi) oluşur. Hemen hemen tüm ticari/incelenen TE modüllerde, düşük sıcaklık tarafında tellür alaşımları kullanılmaktadır. Bunun nedeni oda sıcaklığında yüksek performans göstermeleridir, ancak tellür doğada az bulunan pahalı elementlerden biridir. Bu nedenle, TE cihazlarının büyük ölçekli üretiminde kullanılaması tercih edilmez. TE malzemeler üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmış olsa da, bugüne kadar, modüllerin büyük ölçekli üretimi için oda sıcaklığında kullanılabilecek ucuz, bol ve yüksek performanslı tellür içermeyen TE malzemesi henüz tam anlamıyla keşfedilmemiştir. Her öğenin küresel kullanılabilirlik düzeyi, Şekil 2.9a)'da gösterildiği gibi milyon başına parça (PPM) olarak gösterilmektedir. Oda sıcaklığına yakın yerlerde yüksek performans ve en yaygın kullanılan TE malzemeler Bizmut (Bi) ve telluryum (Te)'dur (Hamawandi vd., 2020a). Ancak Şekil 2.9a)'ya bakıldığında bu iki elementin doğadaki bolluk seviyesinin oldukça az olduğu görülebilmektedir. Te bolluk seviyesi 0.001 PPM ve Bi elementinin ise 0.025 PPM'dir, Bakırın (Cu) ve Kükürtün (S) bolluk seviyesi ise sırasıyla 68 PPM ve 420 PPM'dır. Örneğin, Bi_2Te_3 ve Sb_2Te_3 TE malzemelerinin hazırlanmasında, bileşiklerin %47,8 ve %61,12'si telluryumdur. Bu, yüksek performanslı TE malzemeleri üretmek için önemli miktarda Te'ye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Ayrıca, telluryum TE malzemelerinin bir parçası olarak kullanılan en pahalı elementlerden biridir.

Şekil 2.9b)'de telluryuma göre normalize edilmiş TE malzemelerinin maliyetini göstermektedir (U.S. Geological Survey, 2020). Bu şekilde sunulan elementler arasında kükürt en düşük maliyete sahipken, gümüş en yüksek maliyete sahiptir. Telluryum'un ve Bakır'ın maliyeti karşılaştırıldığında, Bakır' ın maliyetinin Telluryum'dan daha düşük olduğu görülebilmektedir. TE elemanların potansiyel riski/toksisitesi küresel uyumlaştırılmış sistem (GHS) sınıflandırması ve ortamca öldürücü doz (LD50) değeri kullanılarak ölçülebilmektedir. GHS değerleri 1 – 8 aralığında bulunmaktadır ve bir elementin toksisitesi GHS değerindeki artışla artmaktadır. Bir elementin LD50 değeri, deneklerin yarısını iki hafta içinde öldüren ve bir denek için birim kütle başına uygulanan doz seviyesini tanımlarken, LD50 değerindeki düşüşle elementin tehlikeliliği artar. Şekil 2.9c) TE uygulamaları için elementlerin LD50 ve GHS'nin değerlerini göstermektedir (Ge ve ark., 2016). Telluryum'un LD50 değeri çok düşüktür, bu nedenle küçük miktarlarına da maruz kalma halinde ciddi hasara veya can kaybına yol açabileceğini göstermektedir. Aynı şekilde, Te GHSnin değeri GHS08'e sahip kurşundan (Pb) sonra ikinci sıradadır, Pb'nin kansere neden olduğu bilinmektedir. Selenyum'un GHS değeri yüksektir ve LD50 seviyesi yaklaşık 6000 mg/Kg' dır. Yani onun toksisitesit yüksektir ve

sadece büyük miktarda solunması/yutulması durumunda ciddi hasara neden olabilmektedir. Öte yandan bakır, düşük GHS değerine ve ılımlı LD50 değerine sahiptir, gümüş ise en güvenli elelement olarak kabul edilmektedir.



Şekil 2. 9: a) Öğelerin kısmen milyon başına kullanılabilirliği, (b) Normalleştirilmiş tellurium maliyeti, (c) Elementlerin LD50 ve GHS değerleri.

Bu tez kapsamında yapılan bir başka çalışmada yukarıda bahsedilen aksaklıkları gidermek için yeni bir TE modül yapısı önerilmiştir. Yeni modül, dört TE malzemesinden (iki *n*-tipi ve iki *p*-tipi) oluşmaktadır. İlk grup (*n*- ve *p*- tipi) Tellür bazlı olup , ikinci grup (n- ve p- tipi) Selenid bazlıdır. Tellürid TE malzemeleri maliyetlidir ancak düşük sıcaklıkta iyi performans gösterirken, Selenid TE malzemeleri nispeten ucuzdur ancak düşük sıcaklıkta düşük performansa sahiptir. Bir modülde kullanılan TE malzemelerinin toplam maliyeti, Tellür bazlı bileşiklerdeki Tellur elementinin stratejik olarak selenitler ile değiştirilmesiyle azaltılabilir. Ancak modülün iyi çıkış performansını yüksek tutmak içinde tellür alaşımlarının bir oranını korumak gerekir. Yeni modülün uygulanabilirliğini kontrol etmek için termoelektrik, termomekanik ve maliyet-güç analizleri yapılmıştır, sonuçlar bulgular bölümünde verilmiştir.

2.11. TERMOELEKTRİK MODÜLLERİN UYGULAMALARI

TE modülleri, nano watt ile birkaç watt arasında olabilen geniş çıkış gücü varyasyonları nedeniyle çok çeşitli uygulamalar için uygundur. TE modüllerinin uzay teknolojilerinde (Rowe, 2006), araba egzozlarında (Albatati ve Attar, 2021), termoelektrik soğutucunun güçlendirilmesinde (Yusuf ve ark., 2021), güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde (Kraemer vd., 2016; Maduabuchi vd., 2021; Maduabuchi ve Mgbemene, 2020), fotovoltaik hücrelerin arka tarafında termal enerjinin çıkarılmasında (Yin ve ark., 2019), gaz türbini ile entegrasyonunda (Stathopoulos ve Fernàndez-Villa, 2018), giyilebilir sensörlerde (Wang ve ark., 2018, 2017), bir TE soğutucusunun ısı emicisinde (Teffah ve ark., 2018), taşınabilir düşük güçlü elektronik cihazlarında (Feng ve ark., 2019; Im ve ark., 2020; Wen ve ark., 2021, 2020) ve hidrojen üretiminde (Li, 2020) yaygın olarak kullanılmaktadır.

3. YÖNTEM

3.1. MALZEME SENTEZI

Termoelektrik malzemeler, mikrodalga destekli termoliz (Ballikaya vd., 2019b), katı hal reaksiyon (Ballıkaya vd., 2019c; Tang ve ark., 2001), mekanik alaşım (Ballıkaya vd., 2019c; Prado-Gonjal ve ark., 2017; Yang ve ark., 2004), solvo-termal (Yang ve ark., 2015b), erime ve tavlama (Ballikaya vd., 2013a; Dong ve ark., 2013), hızlı söndürme yöntemleri (Ballikaya vd., 2019c), nanokristal sentez (Forster ve ark., 2017; Ibáñez vd., 2016; Ortega vd., 2017) gibi yöntemler ile üretilebilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen TE bileşikler katı hal reaksiyon yöntemi ile hazırlanmıştır. Buna göre; yüksek saflıkta Sb tozları %99.999; Se %99.999; Bi %99.999, Te %99.999, Cu %99.999 ve Ag granülleri % 99.999 (sigma-Aldrich) eldivenli kabin (glove box) içerisinde (Inert, Şekil 3.1a) stokiyometrik oranda tartılıp karıştırılmıştır. Daha sonra $Cu_2Se_{1.01}$ ve $Ag_2Se_{1.01}$ numuneleri özel kapaklı grafit potalara yerleştrilip vakumlu tüp fırına konulup fırın sıcaklığı (MSE fırını) dakikada 2 °C oranında artacak şekilde 1050 °C' ye ısıtıldı (Şekil 3.1b). Numuneler 10 saat boyunca 1050 °C'de tutuldu ve daha sonra dakikada 4 °C hızında 600 °C'ye soğutuldu. Fırın 72 saat boyunca bu sıcaklıkta tutulduktan sonra kapatıldı ve numunelerin oda sıcaklığına soğutulması sağlandı.

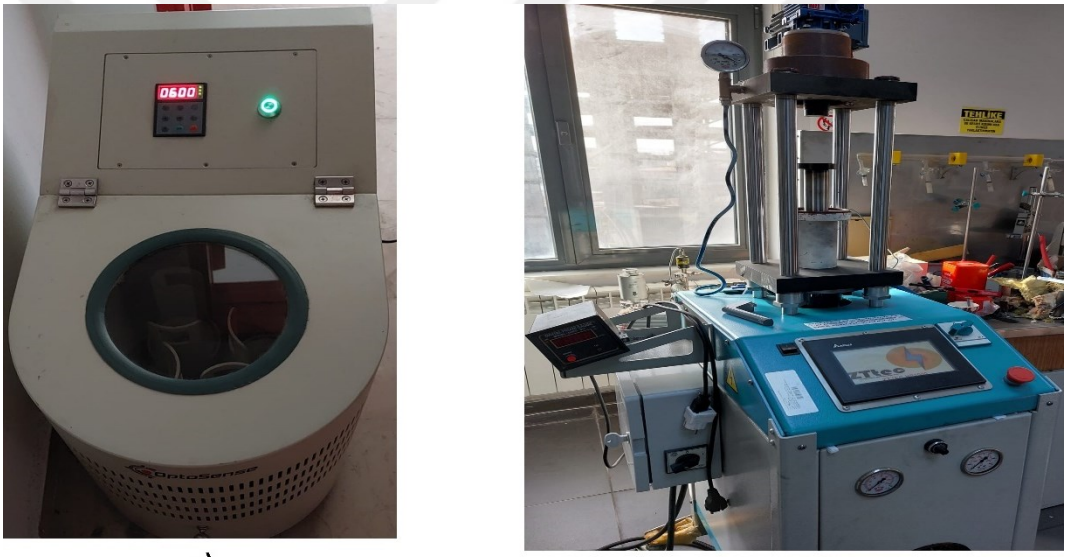


a) b)

Şekil 3. 1: a) Eldiven kabin, b) MSE Fırını.

Fırından çıkarılan numuneler daha sonra eldivenli kabin içerisinde havanda öğütülerek toz hale getirildi. Benzer şekilde Bi_2Te_3 ve Sb_2Te_3 bileşikleri üretildi (fırın sıcaklığı 700 ^oC çıkarılarak).

Dört numunenin tamamı ($Cu_2Se_{1.01}$, $Ag_2Se_{1.01}$, $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ ve $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$) zirkonyum oksit kaplarına yüklendi ve her numunenin ağırlığının on katı ağırlıktaki zirkonyum oksit topları ile zirkonyum oksit kabına eklenmiştir. Bu oran ince tozlarda homojenliği sağlamak için seçilmiştir. Numuneler 600 d/d'de 8 saat bilyalı öğütücüde Optosense, Şekil 3.2a) karıştırılarak tane boyutu küçük homojen yapıda bileşikler elde edildi. Daha sonra toz numuneler soğuk presle sıkıştırılarak pellet haline getirildi (ZTtech-Hp1000, Şekil 3.2b). Disk şeklindeki Cu_2Se ve Ag_2Se örnekleri daha sonra 600 ^oC sinterlenerek kristal yapının tam oturması sağlandı. Daha sonra disk şeklindeki numuneler tekrar toz hale getirilerek mekanik öğütücüde tane boyutu küçültülmüş kristalli yapıdaki bileşikler oluşturulmuştur. Son aşamada örnekler tekrar soğuk pres ve sonrasında TE ölçümler ve modül üretimi için kesilmiştir. Benzer süreç Tellür bazlı bileşikler içinde yapılmış olup sinterleme sıcaklığı bu bileşiklerde 450 ^oC olarak uygulanmıştır.

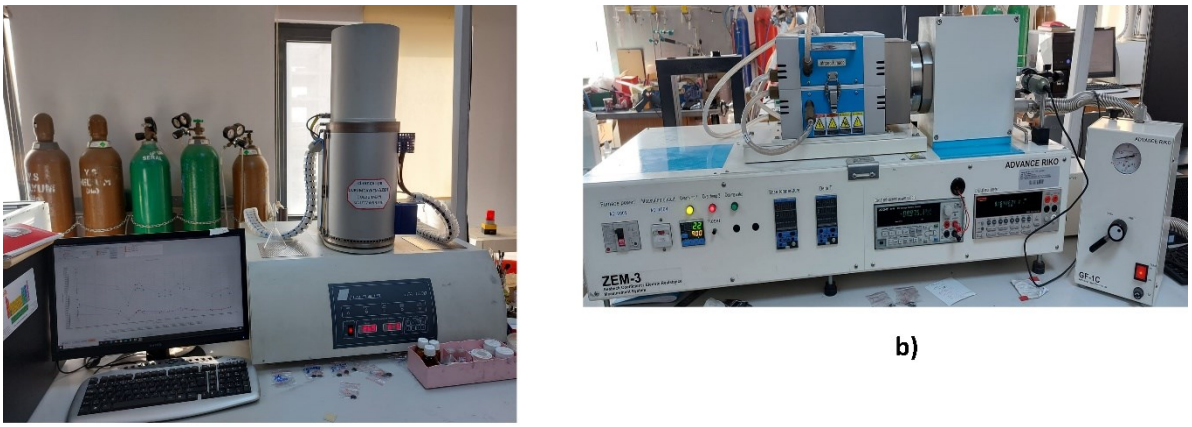


Şekil 3.2: a) Bilye frezeleme, b) Soğuk pres makinesi.

3.2. MALZEME KARAKTERİZASYONU

Yukarıda anlatıldığı gibi üretilen toz haldeki her numunenin küçük bir kısmı soğuk presle 300 MPa basınç preslenerek yaklaşık 2 mm silindirik disk elde edilmiştir. Bu disklerden numunelerin yoğunlukları hesaplandı. Hesaplanan yoğunluklar teorik değerlerin yaklaşık %80-90 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Termal iletkenlik analizi için disk şeklindeki numunelerin yüzeyi grafit sprey ile kaplanmış ve Lazer flash termal iletkenlik cihazi (LINSEIS LFA 1000, Şekil 3.3a) ile analizler yapılmştır. Her sıcaklıkta, termal geçirgenlik ve ısı kapasitesi ölçüldü ve buna karşılık gelen toplam termal iletkenlik, $\kappa = D\rho C_p$ ile hesaplandı.

Burada D termal geçirgenlik katsayısı, ρ kütle yoğunluğunu ve C_p ise spesifik ısı kapasitesini göstermektedir.



a) b)

Şekil 3. 3: a) Lazer flaş analizörü (LFA1000), b) ZEM-3 Seebeck katsayısı ve elektrik direnci ölçümü.

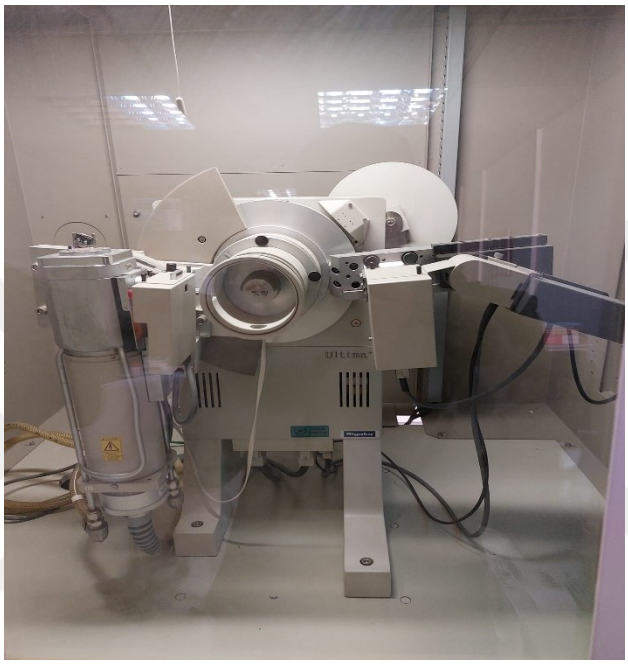
LFA da ölçülen disk şelindeki numuneler daha sonra elmas dönerli bıçak kesici ile diktörgen prizma şeklinde kesilerek, elektriksel iletkenlik ve Seebeck katsayısı ölçümleri (Ulvac ZEM-3, şekil 3.3b) yapıldı. Seebeck katsayısı ve elektriksel iletkenlik ölçümleri 4 nokta ölçüm yöntemi ile yapılmış ve ölçümler 5% He gaz ortamı altında alınmıştır. Seebeck katsayısı, malzeme içerisindeki esas taşıyıcı tipini belirlemekte (işareti) ve zT değerinin hesaplanmasında kullanılan kritik parametrelerden biridir. Taşıyıcı tipini belirlemede kullanılan bir diğer yöntem Hall ölçümüdür. Hall katsayısı (R_H) delikler için pozitif, elektronlar için negatiftir. Hall ölçümünden taşıyıcı hareketliliği (mobilite)$\mu_c = \sigma R_H n_c$ ve yüklü taşıyıcı konsantrasyonu $n_c = (eR_H)^{-1}$ hesaplanabilmektedir (Ballikaya ve ark., 2019b). Böylece bileşiğin taşınım özellikleri daha detaylı olarak incelenebilmektedir.

Bileşiklerin yapısal özellikleri TXIK (Toz X-ışını kırınımı-Powder X-Ray Diffraction-PXRD) ve TEM (Tarama Elektron Mikroskobu) ile analiz edildi. TXIK analizleri, Rigaku Ultima X-ışını difraktometresi (Şekil 3.4) ile yapılırken, TEM analizlerinde Phenon ProX Tarama Elektron Mikroskobu kullanıldı. TXIK temel olarak bir malzemeyi kırınım desenine göre tanımlamak için kullanılır. Ayrıca, iç kusurlar TXIK'nin faz tanımlaması ile tanımlanabilir. Çalışma prensibi, kristal atomları, atomların elektronlarıyla etkileşime girdiğinde, elektromanyetik radyasyon dalgalarını (X-ışını) dağıtırlar; Sonuç olarak, elektronların dizisi

tarafından bir dizi küresel dalga üretilir. Dalgalar birbirlerini çoğu yönde iptal eder (yıkıcı müdahale), birkaç yöne yapıcı bir şekilde eklerken, bu Bragg yasası tarafından verilir:

$$n_i\lambda = 2d\sin\theta \tag{3.1}$$

n_i bir tamsayıdır, λ ışın dalga boyudur, d dağınık düzlemler arasındaki mesafedir, θ olay açısıdır.



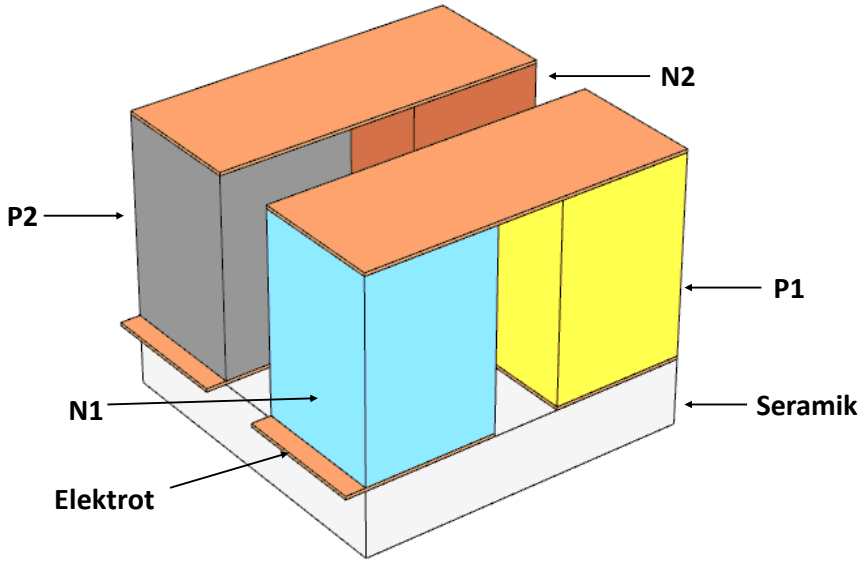
Şekil 3.4: Rigaku Ultima X-ışını difaraktometresi.

Tarama Elektron Mikroskopisi (TEM), bir malzemenin yüzey topografyasının yüksek çözünürlüklü görüntüsünü üretmek için odaklanmış bir elektron demeti kullanır ve bu, malzemede kusurlar, kirletici, kırık veya korozyon olup olmadığını belirlemekte kullanılır.

3.3. TEORİK ANALİZ

Bölüm 2.10'da bahsedilen sistemler bir/üç boyutlu enerji denklemleri MATLAB veya COMSOL Multipysics ile analiz edildi. Bu iki program hakkında detaylı bilgi referanslarda bulunabilir. Yukarıda sentezlenen TE mazemelerin özellikleri COMSOL Multiphysics üzerinde TEJ için modellendi ve analiz edilip, optimize edildi. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi TE modül iki TE bacaktan oluşmaktadır. Her bir TE bacak farklı bir TE malzeme kümesine sahiptir *p*- ve *n*-tipi. TE malzemelerinin ilk grup $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$ (P1) ve $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ (N_1), ikinci grup ise Cu_2Se (P_2) ve Ag_2Se (N_2). Oda sıcaklığı, $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$ ve $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ yüksek performanslar

göstermesi nedeniyle en çok kullanılan TE malzemeleridir. Ancak bu malzemelerin önemli bir parçası olan telluryum hem doğada oldukça az hem de toksiktir. TE modüllerin performansını artırıp aynı zamanda telluryuma olan bağımlılığı azaltmak için, ikinci grup Cu_2Se ve Ag_2Se kullanıldı.



Şekil 3.5: İki çiftli TEJ.

TE malzemelerinin yeni kombinasyonundan oluşan TE modülün performansını belirlemek için iki çift TE bacaktan oluşan modül analiz edildi. Malzemelerin oranı Tablo 3.1'de verilirken, Tablo 3.2'de TE modülün bileşenlerinin boyutu, Tablo 3.3'de ise ve malzmelerin özellikleri gösterildi. Üç modül COMSOL Multi-physics'te tasarlanmış, optimize edilmiş, daha sonra imal edildikten sonra karakterize edilmiştir

Tablo 3.1: Termoelektrik bacaklarda kullanılan malzemelerin oranı.

TE Malzemesi	Durum 1	Durum 2	Durum 3
$Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$ (P_1) ve $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ (N1)	%100	%50	%0
Cu_2Se (P_2) ve Ag_2Se (N_2)	%0	%50	%100

Tablo 3.2: Termolektrik modülün boyutu.

Parametre	Boyut
Seramik	$5 \times 5 \times 0{,}5$ mm^3
Bacak	$2 \times 2 \times 3$ mm^3
Bakır	$5 \times 2 \times 0{,}1$ mm^3
Lehim	$2 \times 2 \times 0{,}05$ mm^3
Çift sayısı	2

Tablo 3.3: Malzemelerin özellikleri.

Malzeme	ρ_d kg m^{-3}	C_p J kg^{-1} K^{-1}	μ	CTE K^{-1}	E GPa	k W m^{-1} K^{-1}	σ S m^{-1}
$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$	7740	——	0.23	0.8-1.32 $\times 10^{-5}$	65-59	——	——
$Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$	6500	——	0.241	2.2 $\times 10^{-5}$	80.9	——	——
Cu_2Se	6830	——	0.34	2.3 $\times 10^{-5}$	66	——	——
Ag_2Se	7749	——	0.29	2.25 $\times 10^{-5}$	53.6	——	——
Seramik	3970	800	0.22	6.8 $\times 10^{-6}$	340	25	1 $\times 10^{-12}$
Bakır	8930	386	0.3	1.7 $\times 10^{-5}$	120	385	5.9 $\times 10^{7}$
Lehim	7240	210	0.33	2.7 $\times 10^{-5}$	44.5	55	2 $\times 10^{7}$

3.3.1. Analizlerde Kullanılan Temel Denklemler

Teorik analizler ısı denklemlerine dayanmaktadır. Termoelektrik etkilerle birleştirilen üç boyutlu ısı enerjisi denklemleri aşağıdaki gibidir (Jia ve Gao, 2014):

$$\boldsymbol{q} = -k\nabla T + ST\boldsymbol{J} \tag{3.2}$$

$$Q = -\nabla V \cdot \boldsymbol{J} \tag{3.3}$$

$$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} - \sigma S \nabla T \tag{3.4}$$

burada $\boldsymbol{q}$ (W/m^2) ısı akısı, $\boldsymbol{J}$ (A/m^2) akım yoğunluk, Q (W) ısı kaynağı, k (W/(m K)) termal iletkenliği, $\boldsymbol{E}$ (V/m) elektrik alan yoğunluğu vektörü, S (μV/K) Seebeck katsayısı, σ (S/m) elektrik iletkenliği, T (K) sıcaklık, V (V) elektrik potansiyel. Denklem 3.2'nin sağ tarafındaki terimler Fourier ısı iletimi ve Peltier ısısını, denklem 3.4'ün sağ tarafındakiler ise sırasıyla Ohm yasası ve Seebeck etkisini temsil etmektedir.

Isı enerjisinin korunumu aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{q} = Q \tag{3.5}$$

Yukarıdaki denklemler birleştirilerek aşağıdaki termoelektrik ısı enerji denklemi elde edilir:

$$\nabla \cdot (\mathrm{k}\nabla T) + \frac{\boldsymbol{J}^2}{\sigma} - T\boldsymbol{J} \cdot \nabla \mathrm{S} = 0 \tag{3.6}$$

Denklemde eşitliğin sol tarafındaki soldan birinci ve ikinci terim ısı iletimi ve Joule'un ısısını üçüncü ve dördüncü terim ise Thomson ve Peltier etkisini göstermektedir.
TE malzemelerinin taşıma özellikleri sıcaklığa bağlıdır ve bu nedenle, yeni tasarlanan modülün termal iletkenliği ve iç direnci sırasıyla şu şekilde verilir (Yusuf ve Ballıkaya, 2022):

$$K_{TE} = \left[\frac{n}{L}\left(\frac{A_{p1}}{T_h - T_c}\int_{T_c}^{T_h}\kappa_{p1}(T)dT + \frac{A_{n1}}{T_h - T_c}\int_{T_c}^{T_h}\kappa_{n1}(T)dT\right)\right] + \left[\frac{m}{L}\left(\frac{A_{p2}}{T_h - T_c}\int_{T_c}^{T_h}\kappa_{p2}(T)dT + \frac{A_{n2}}{T_h - T_c}\int_{T_c}^{T_h}\kappa_{n2}(T)dT\right)\right] + K_l \tag{3.7}$$

$$R_{TE} = \left[nL\left(\frac{1}{\frac{A_{p1}}{T_h - T_c}\int_{T_c}^{T_h}\sigma_{p1}(T)dT} + \frac{1}{\frac{A_{n1}}{T_h - T_c}\int_{T_c}^{T_h}\sigma_{n1}(T)dT}\right)\right] + \left[mL\left(\frac{1}{\frac{A_{p2}}{T_h - T_c}\int_{T_c}^{T_h}\sigma_{p2}(T)dT} + \frac{1}{\frac{A_{n2}}{T_h - T_c}\int_{T_c}^{T_h}\sigma_{n2}(T)dT}\right)\right] + R_{con} \tag{3.8}$$

Burada L TE bacağının uzunluğunu, A_p ve A_n ise p- ve n- tipi bacakların kesit alanını temsil eder, k_p ve k_n p- ve n-tipi bacakların termal iletkinliğidir, n ve m grup 1 ve 2 için TE bacak sayısıdır. σ_p ve σ_n ise p- ve -n tipi bacakların elektriksel iletkenliği, T_h ve T_c sıcak ve soğuk tarafların sıcaklıklarıdır. K_l ve R_{con} ise sırasıyla paralel ısı iletkenliği ve temas direnc kayıplarını temsi etmektedir.

Grup 1 ve grup 2 için toplam Seebeck katsayısı sırasıyla

$$S_1 = S_{p1}(T) - S_{n1}(T) \tag{3.9}$$

$$S_2 = S_{p2}(T) - S_{n2}(T) \tag{3.10}$$

ile verrilir, burada S_{p1}, S_{p2}, S_{n1}, S_{n2} sırasıyla p- ve n- tipi malzemelerin sıcaklığa bağlı Seebeck katsayılarıdır.

Thomson katsayıları denklemler 3.9 ve 3.10'den alınır:

$$\tau_1 = \tau_{p1} - \tau_{n1} = \frac{1}{T_h - T_c}\int_{T_c}^{T_h} TS_1'(T)\, dT \tag{3.11}$$

$$\tau_2 = \tau_{p2} - \tau_{n2} = \frac{1}{T_h - T_c}\int_{T_c}^{T_h} TS_2'(T)\, dT \tag{3.12}$$

TE modülün sıcak tarafında ısı emilirken (Q_h) soğuk tarafında ise ısı yayımlanır (Q_c):

$$Q_h = n\left[S_{h1}T_hI - \frac{1}{2}I^2R_1 - \frac{1}{2}\tau_1 I(T_h - T_c) + K_1(T_h - T_c)\right] + m\,[S_{h2}T_hI - \frac{1}{2}I^2R_2 - \frac{1}{2}\tau_2 I(T_h - T_c) + K_2(T_h - T_c)] \tag{3.13}$$

$$Q_c = n\,[S_{c1}T_cI + \frac{1}{2}I^2R_1 + \frac{1}{2}\tau_1 I(T_h - T_c) + K_1(T_h - T_c)] + m\,[S_{c2}T_cI + \frac{1}{2}I^2R_2 + \frac{1}{2}\tau_2 I(T_h - T_c) + K_2(T_h - T_c)] \tag{3.14}$$

Denklem 3.13 ve 3.14'de, köşeli ayraçların içerisinde yer alan ilk terim Peltier gücü olup, ikinci, üçüncü ve dördüncü terimler sırasıyla Joule'un ısısını, Thomson ısısını ve Fourier ısısını yansıtmaktadır. Elektrik çıkış gücü şöyle verilir:

$$P_o = I[T_h(n\,S_{h1} + m\,S_{h2}) - T_c(n\,S_{c1} + m\,S_{c2})] - I^2(n\,R_1 + m\,R_2) - I(T_h - T_c)(n\,\tau_1 + m\,\tau_2) \tag{3.15}$$

Modülde akan maksimum akım (*Imax*) ise şöyle verilir:

$$I_{max} = \frac{T_h(n\,S_{h1} + m\,S_{h2}) - T_c(n\,S_{c1} + m\,S_{c2}) - (T_h - T_c)(n\,\tau_1 + m\,\tau_2)}{2\,(n\,R_1 + m\,R_2)} \tag{3.16}$$

Buradan maksimum çıkış gücü şu şekilde verilir:

$$P_{max} = \frac{[T_h(n\,[S_{h1} - \tau_1] + m[S_{h2} - \tau_2]) - T_c(n\,[S_{c1} - \tau_1] + m[S_{c2} - \tau_2])]^2}{4\,(n\,R_1 + m\,R_2)} \tag{3.17}$$

Burada R_1 ve R_2 TE bacakların birinci ve ikinci grup için dirençleridir. Ayrıca maksimum gücün oluştuğu noktada yük direnci $R_L = n\,R_1 + m\,R_2$ ile bulunur.

Enerji dönüşüm verimliliği denklem 3.15'in 3.13'e bölünmesi ile elde edilir. Bunun sonucu olarak verimlilik denklemi 3.18'deki halini alır:

$$\eta = \frac{I[T_h(n\,S_{h1} + m\,S_{h2}) - T_c(n\,S_{c1} + m\,S_{c2})] - I^2(n\,R_1 + m\,R_2) - I(T_h - T_c)(n\,\tau_1 + m\,\tau_2)}{IT_h(n\,S_{h1} + m\,S_{h2}) - \frac{I^2}{2}(n\,R_1 + m\,R_2) - \frac{I}{2}(T_h - T_c)(n\,\tau_1 + m\,\tau_2) + (T_h - T_c)(n\,K_1 + m\,K_2)} \tag{3.18}$$

Aynı şekilde, en yüksek enerji dönüşüm verimliliğinde elde edilecek elektriksel akım şöyle verilir:

$$I_{opt} = \frac{T_h(n\,S_{h1} + m\,S_{h2}) - T_c(n\,S_{c1} + m\,S_{c2}) - (T_h - T_c)(n\,\tau_1 + m\,\tau_2)}{(n\,R_1 + m\,R_2)\left[1 + \sqrt{1 + ZT}\right]} \tag{3.19}$$

En yüksek enerji dönüşüm verimliliği denklem 3.20 ile bulunur.

$$\eta_{opt} = \frac{\beta\sqrt{1 + ZT}}{\left[1 + \sqrt{1 + ZT}\right]T_h(n\,S_{h1} + m\,S_{h2}) - 0.5\{\beta + \left[1 + \sqrt{1 + ZT}\right](T_h - T_c)(n\,\tau_1 + m\,\tau_2)\} + \frac{(T_h - T_c)(n\,K_1 + m\,K_2)}{\beta}(n\,R_1 + m\,R_2)\left[1 + \sqrt{1 + ZT}\right]^2} \tag{3.20}$$

Burada $\beta = T_h(n\,S_{h1} + m\,S_{h2}) - T_c(n\,S_{c1} + m\,S_{c2}) - (T_h - T_c)(n\,\tau_1 + m\,\tau_2)$

TE malzemeleri boyutsuz değerlik katsayısı şu şekilde olacaktır:

$$ZT = \frac{0.5\,\beta\,[T_h\,(n\,S_{h1} + m\,S_{h2}) + T_c\,(n\,S_{c1} + m\,S_{c2})]}{(T_h - T_c)\left[\sqrt{(n\,k_{p1}(T) + m\,k_{p2}(T))\,(n\,\rho_{p1}(T) + m\,\rho_{p2}(T))} + \sqrt{(n\,k_{n1}(T) + m\,k_{n2}(T))\,(n\,\rho_{n1}(T) + m\,\rho_{n2}(T))}\right]^2} \tag{3.21}$$

TE modülün mekanik mukavemetini belirlemek için mekanik gerilme analizi yapılması gerekmektedir. Gerilme-yer değiştirme arasındaki ilişki (Wu ve ark., 2014) aşağıdaki şekilde verilmiştir :

$$\bar{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial\bar{u}}{\partial\bar{x}}, \bar{\varepsilon}_{yy} = \frac{\partial\bar{v}}{\partial\bar{y}}, \bar{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial\bar{w}}{\partial\bar{z}} \tag{3.22}$$

$$\bar{\varepsilon}_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial\bar{y}} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial\bar{x}}\right), \bar{\varepsilon}_{yz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\bar{w}}{\partial\bar{y}} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial\bar{z}}\right), \bar{\varepsilon}_{xz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\bar{w}}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial\bar{u}}{\partial\bar{z}}\right) \tag{3.23}$$

Simetrik olmayan Jacobian matrisi kullanılarak, gerginliğin boyutsuz formu - gerinim ilişkisi ise şu şekilde verilir:

$$\begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_{xx} \\ \bar{\sigma}_{yy} \\ \bar{\sigma}_{zz} \\ \bar{\sigma}_{yz} \\ \bar{\sigma}_{zx} \\ \bar{\sigma}_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{\bar{E}}{(1+v)(1-2v)} \begin{bmatrix} 1-v & v & v & 0 & 0 & 0 \\ v & 1-v & v & 0 & 0 & 0 \\ v & v & 1-v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\varepsilon}_{xx} \\ \bar{\varepsilon}_{yy} \\ \bar{\varepsilon}_{zz} \\ \bar{\varepsilon}_{yz} \\ \bar{\varepsilon}_{zx} \\ \bar{\varepsilon}_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \frac{\bar{\alpha}\bar{E}\bar{T}}{(1-2v)} \tag{3.24}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}} \tag{3.25}$$

3.3.2. Sınır Koşulları

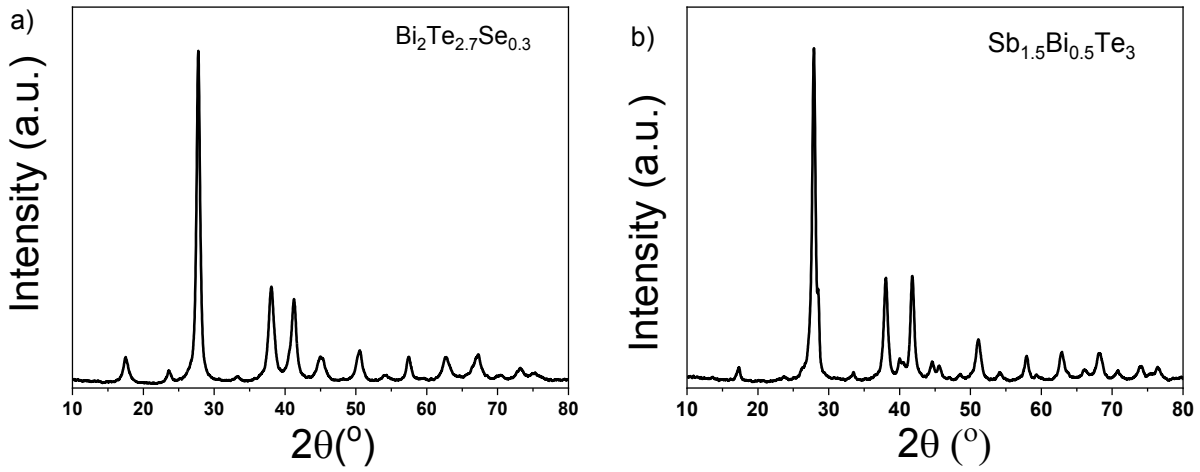
Denklemler şu sınır koşulları baz alınarak çözülmüştür. Bunlar sırasıyla sistem kararlı durum ısı akışı altında olduğu, Thomson etkisinin dahil edildiği fakat konveksiyon ve radyasyon ısı kayıplarının ihmal edildiği ve soğuk yüzey sıcaklığının 293 K'de sabit olduğu, bunun yanı sıra elektriksel ve termal dirençlerinsırasıyla 4.8×10^{-9} Ω m^2 ve 3×10^{-4} m^2 K W^{-1} olarak kabul edildiği durum dikkate alınarak çözüldü (Högblom ve Andersson, 2014).

4. BULGULAR

4.1. DÜŞÜK MALİYETLİ MODÜL ÜRETİM MEKANİK, MALİYET VE PERFORMANSININ ÖLÇÜM VE KARAKTERİZASYON

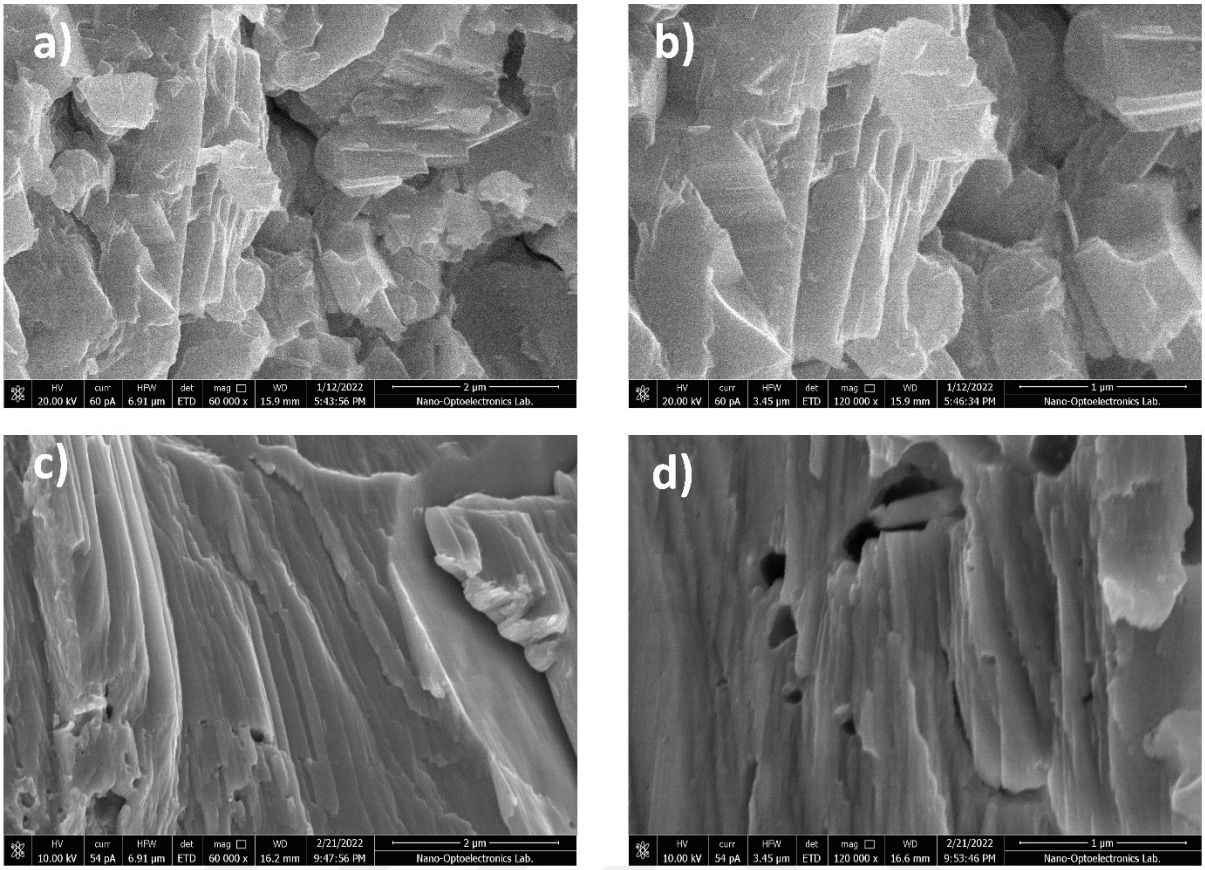
4.1.1. Toz X-ışını Kırınımı ve Tarama Elektron Mikroskobu Analizleri

TE malzemeler modül yapımında kullanılmadan önce yapısal özellikleri içerisindeki kusurların, safsızlıkları ya da kompozisyonunu belirlemek için yapısal analizler yapmak gerekir. Bu analizlerden biri Toz X Işını Kırınımı, Taramalı Elektron Mikroskopu ve Tünelleme Elektron Mikroskopu'dır. Bölüm 3'te belirtildiği gibi, TE malzemeleri katıhal reaksiyon yöntemiyle sentezlenmiştir. Taşıma özellikleri incelenen numunelerden en yüksek *zT* değeri gösteren bileşikler modül yapımında kullanılmıştır. Numunelerin safsızlığı ve kristal yapısını gösteren TXIK ve TEM analizleri ile taşıma özellikleri Şekil 4'de verilmiştir. Modül yapısında kullanılan *n*-tipi $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$'nin TXIK analizi Şekil 4.1a) da verilmiş olup literatürde (X. Chen ve ark., 2020) verilen Bi_2Te_3 ana kristal yapısı ile uyumlu olduğu görülmüştür. *P*-tipi $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$'nin TXIK analizi ise Şekil 4.1 b) verilmiş olup sonuçların TE literatürle (Mi ve ark., 2019) uyumlu olduğu görülmektedir. TXIK analizlerinde görülen tepeler her bir düzlemi ve o düzlemdeki atom yoğunluklarını yansıtmaktadır. Tepelerin yüksekliği o düzlemdeki atomların sayısı ile doğru orantılıdır. Diğer bir deyişle tepe yüksekliği ne kadar fazla olursa o düzlemdeki atomların sayısı da o kadar fazladır. Ayrıca Tepeler keskin ve yüksek olması malzemenin kristalli olmasının bir ölçüsüdür. Geniş ve küçük tepeler amorf yapıyı yansıtır. Buna göre Şekil 4.1a) ve 4.1b) deki n tipi ve p tipi TE bileşiklerin sonuçlarına bakıldığında bu bileşiklerin kristalli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, literatürle karşılaştırıldığında $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$ trigonal (hexzagonal) kristal yapısında buna karşın $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ rhombohedral kristal yapısında olduğu ve literatür verileri ile tam uyumlu olduğu görülmektedir



Şekil 4.1: Toz X-ışını kırınım desenleri: a) Kristal fazları $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$'e indeksleri (PDF#50-0954), b) Kristal fazları $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$'e indeksleri (PDF#49-1713).

Cu_2Se ve Ag_2Se örneklerine ait farklı büyütme oranlarına ait SEM görüntüleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.2a,4.2b, 4.2c ve 4.2de sırasıyla gösterilen Cu_2Se ve Ag_2Se bileşiklerin ait 2 μm ve 1 μm'lik farklı büyütmelerini yansıtmaktadır. SEM resimleri modül yapısında kullanılan tüm bileşiklerin mikron seviyesinde katmanlı kristal yapısında oluştuğunu göstermektedir. Katmanlar arasında gözlenen küçük boşluklar presleme kuvvveti ve sinterleme sıcaklığı ile ilişkilidir. Bu boşluklar örneklerin ölçülen gerçek yoğunluğunun teorik yoğunluktan az miktarda düşük olmasının nedenidir.

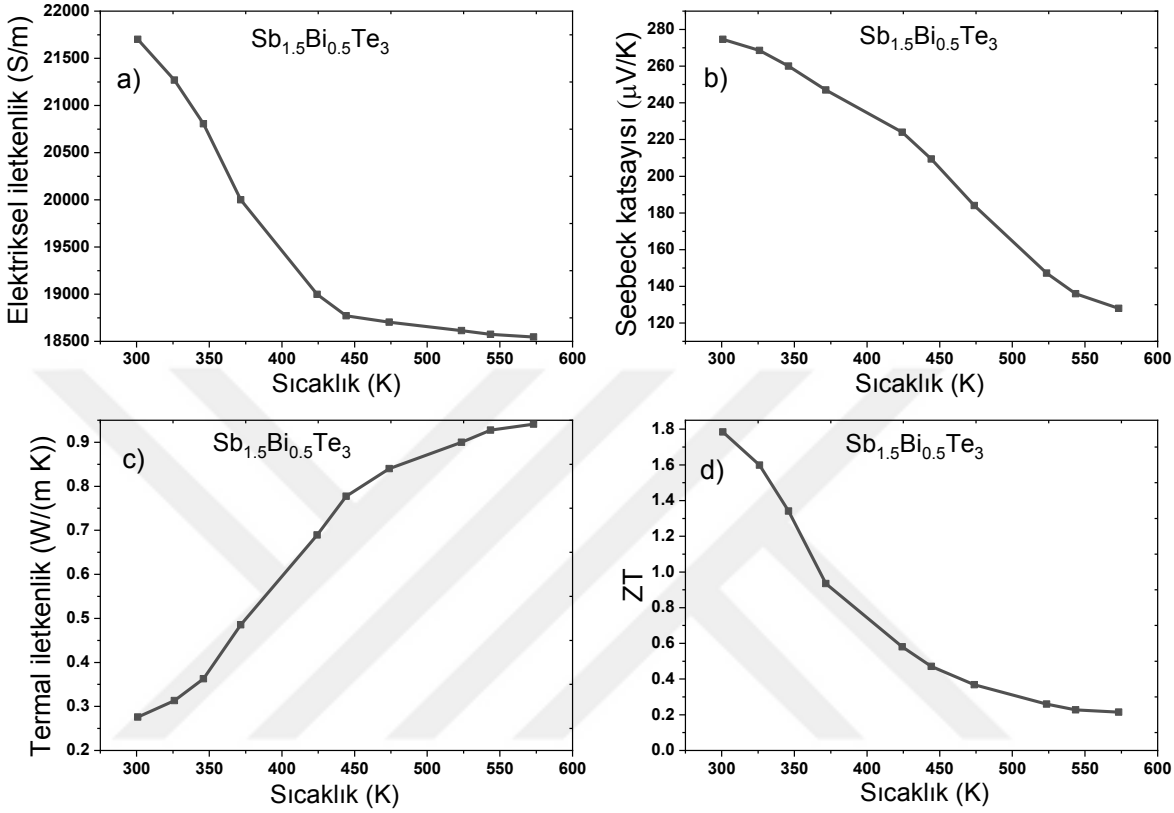


Şekil 4.2: SEM grafikleri:a) 2µm'de Cu_2Se, b) 1µm'de Cu_2Se, c) 2µm'de Ag_2Se, d) 1µm'de Ag_2Se.

4.1.2. Termoelektrik Malzemelerin Tranport Ölçümleri

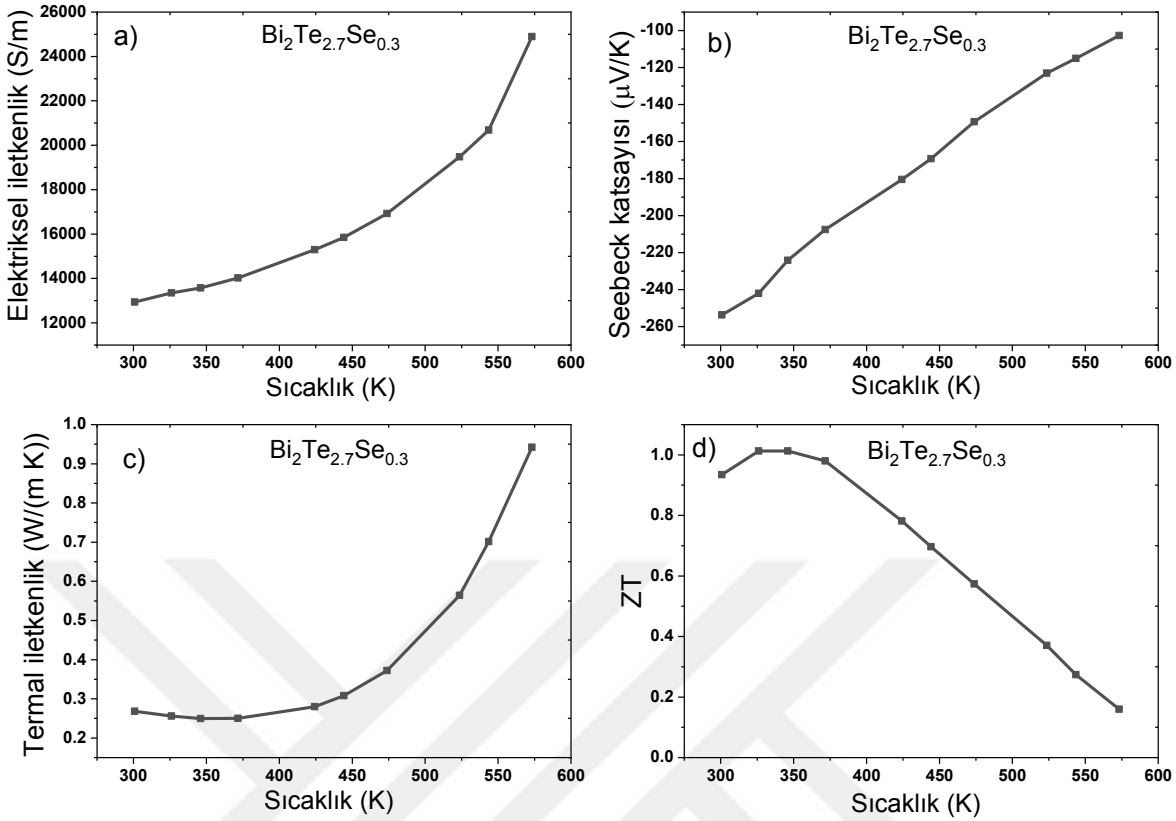
Modül yapısında kullanılan örneklerin TE özellikleri Şekil 4.3 - 4.6 arasında gösterilen Seebeck katsayısı, elektriksel iletkenlik ve termal iletkenliğın sıcaklığa bağlı grafiklerinde görülmektedir. Numunelerin homojenliğini, stabilitesi ve ölçümün tekrarlanabilirliğini test etmek adına her bir numuneden iki farklı parça en az üç kez ölçülmüştür. Daha sonra, elde edilen transport sonuçlarından boyutsuz değerlik katsayısı (*zT*) değeri hesaplandı. $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$ ve $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ sıcaklık ölçüm aralığı Cu_2Se ve Ag_2Se' ninkinden daha düşüktür, çünkü $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$ ve $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ düşük sıcaklık uygulamaları için idealdir. Şekil 4.3a,b,c)'da görüldüğü gibi, $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$'ün elektriksel iletkenlik ve Seebeck katsayısı sıcaklıkla azalmakta buna karşın termal iletkenlik sıcaklıkla artmaktadır. Elektriksel iletkenliğin azalması sıcaklıkla artan elektron-elektron ya da elektron fonon saçılmaları ile açıklanabilir. Seebeck katsayısının sıcaklıkla azalması buna karşın termal iletkenliğin sıcaklıkla artması ise, sıcaklık artışı ile beraber yapı içerisinde termal uyarılmış ikincil yüklü taşıyıcıların yoğunluğunun artması ile açıklanabilir. Termal iletkenliğin oldukça düşük 0,3 W/(m-K) ve Seebeck katsayısının 270 µV/K değerine sahip olması bu bileşiğin iyi bir TE malzeme olduğunun önemli bir

göstergesidir. Nitekim bu fiziksel parametrelerden hesaplan sıcaklığa bağlı *zT* değişimi (Şekil 4.3d) incelendiğinde, maksimum *zT* değerinin ~1.7 değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değer şu ana kadar literatürde elde edilmişen yüksek *zT* değerlerinden biridir.



Şekil 4.3: $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$'ün taşınım özellikleri: a) elektrik iletkenliği, b) Seebeck katsayısı, c) termal iletkenlik, d) boyutsuz değerlik katsayısı.

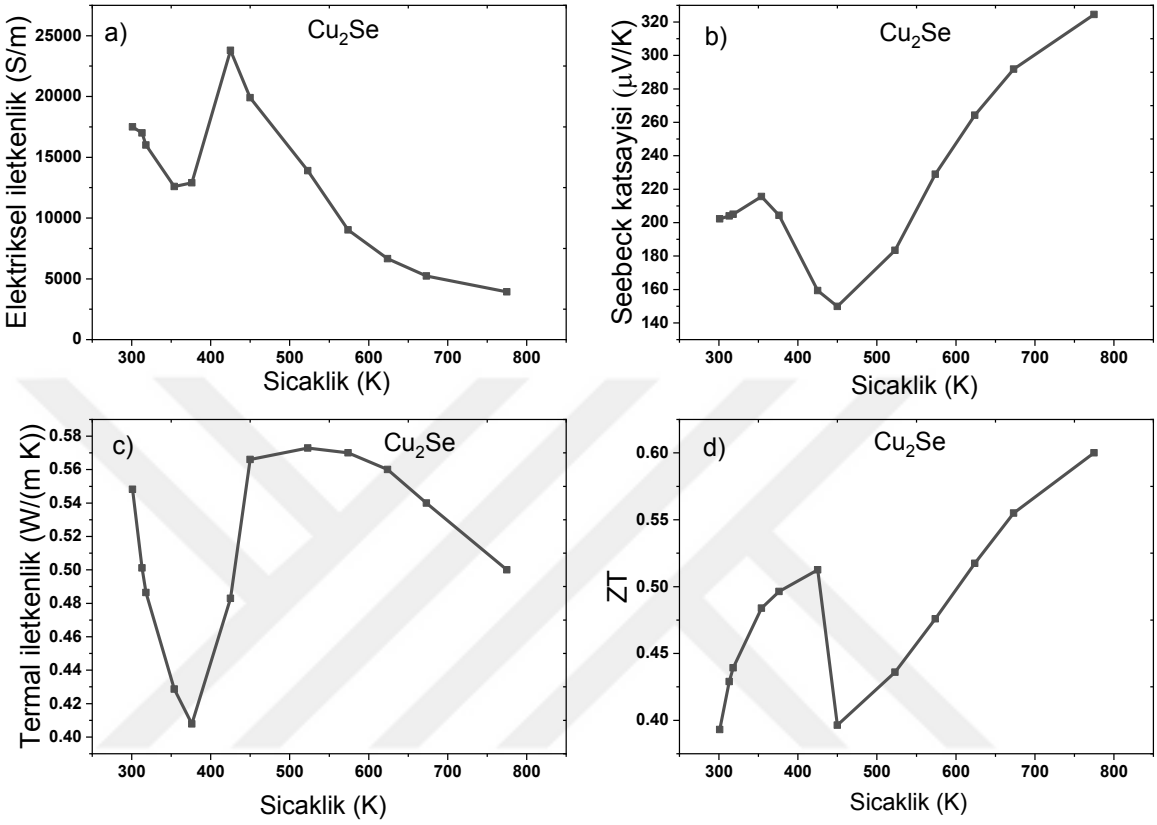
Benzer şekilde Şekil 4.4 a)'de, Şekil 4.4b)'de, ve Şekil 4.4c)'de verilen $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ bileşiğinin taşıma özellikleri incelendiğinde, elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla arttığı, Seebeck katsayısının azaldığı ve termal iletkenliğin ise arttığı görülmektedir. Elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla artması yarıiletken davranışının bir sonucudur. Seebeck katsayısının artması ve termal iletkenliğin sıcaklıkla artması ise sıcaklıkla termal olarak uyarılmış ikincil taşıyıcıların yoğunluğunun artması ile ilişkilidir. Bu değer *n*-tipi BiSbTe grubu bileşikler için yüksek *zT* değerlerinden biridir.



Şekil 4.4: Bi2Te2'nin taşınım özellikleri. 7Se0.3: a) elektrik iletkenliği, b) Seebeck katsayısı, c) Termal iletkenlik, d) boyutsuz değerlik katsayısı.

Süperiyonik bileşikler olarak adlandırılan Cu_2Se ve Ag_2Se bileşiklerine ait transport grafikleri Şekil 4.5 ve 4.6 da verilmiştir. Cu_2Se düşük sıcaklıktaki α-fazından (monoklinik kristal yapı) yüksek sıcaklıktaki *β*-fazına (kübik kristal yapı) faz geçişine uğramaktadır. Geçişin meydana geldiği sıcaklık genellikle 380 – 420 K arasında, bu nedenle, transport özelliklerinin grafikleri, şekil 4.5a)'da ila 4.5c)'de gösterildiği gibi geçiş sıcaklığı çevresinde dalgalıdır. Geçişten önceki düşük sıcaklıktaki *α*-fazında, bir FCC selenyum alt örgüsü içindeki bakır iyonlarının sıralaması nedeniyle altıgen bir yapı elde edilmektedir. *β* yapısına geçiş sırasında iyonların formu düzensizdir. Malzemenin yapısı, Selenyum alt örgüsü nedeniyle kübik hale gelir. Bakırın güçlü fonon saçılmasına neden olan sıvı benzeri davranışı nedeniyle düşük ısı iletkenliği elde edilir. Oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik, Seebeck katsayısı ve termal iletkenlik değerleri sırasıyla 17500 S/m, 202 μV/K ve 0,55 W $m^{-1}K^{-1}$'dir. Faz geçiş sıcaklığında bu değerler sırasıyla 23800 S/m, 160 μV/K ve 0,48 W $m^{-1}K^{-1}$ olarak elde edilmektedir. Ayrıca ölçümün en yüksek sıcaklığı olan 775 K' de değerler 3920 S/m, 324 μV/K ve 0,5 W $m^{-1}K^{-1}$ olmuştur. Üç transport parametreside faz geçişinden etkilendiğinden dolayı, *zT* (değerlik katsayısı) değeri de geçiş sıcaklığında en düşük değere ulaşmaktadır. Faz geçişinden önce ve sonra, şekil 4.5d)'de

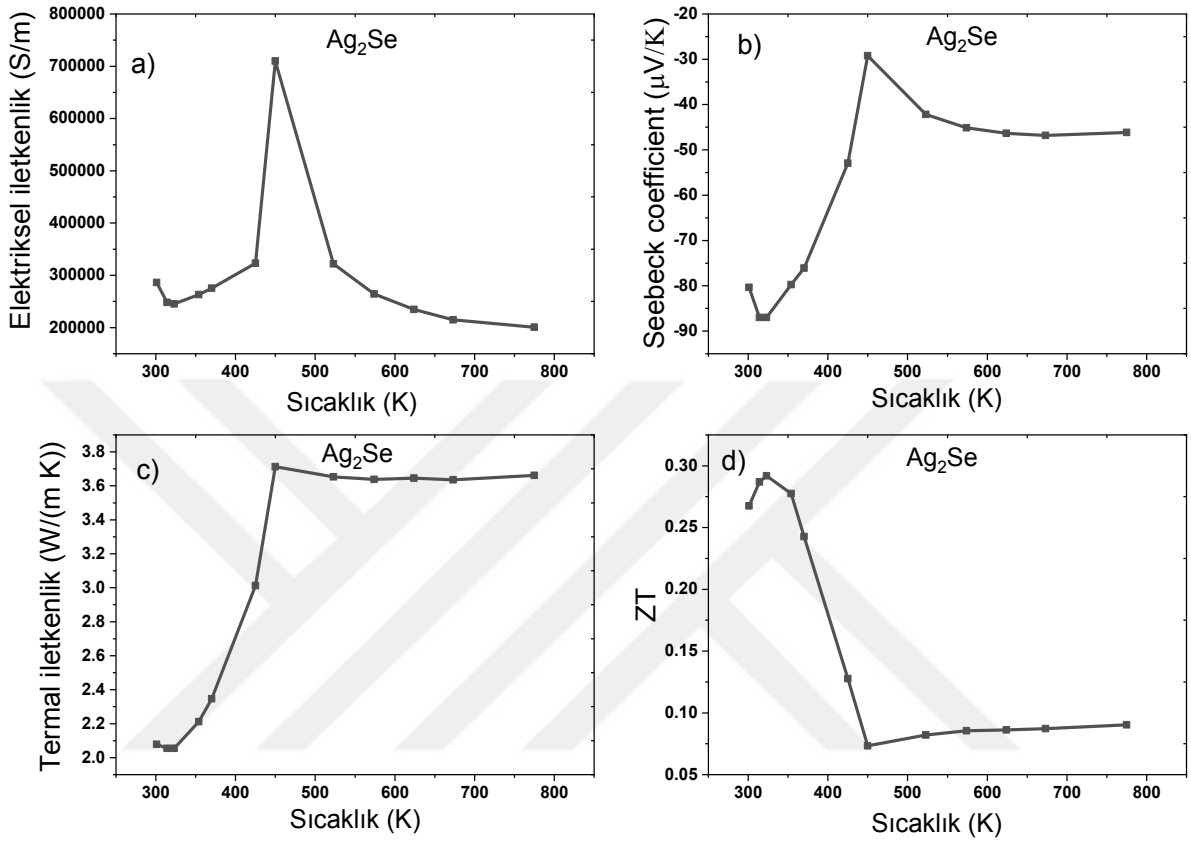
gösterildiği gibi sıcaklıktaki artışla değerlik katsayısıda artmaktadır. Oda sıcaklığında, geçiş sıcaklığında *zT* değerleri 0,39 ve 0,51'dir, aynı şekilde ölçümde dikkate alınan en yüksek sıcaklıkta değer 0,6 olmaktadır.



Şekil 4.5: Cu_2Se'nin taşınım özellikleri: a) elektrik iletkenliği, b) Seebeck katsayısı, c) Termal iletkenlik, d) boyutsuz değerlik katsayısı.

Cu_2Se gibi, Ag_2Se de düşük sıcaklıktaki ortorombik kristal yapıdan yüksek sıcaklıktaki kübik kristal yapıya geçen bir faz geçişine sahiptir. Faz geçişi açıkça şekil 4.6a) ila 4.6d)'da görülebilmektedir. Şekil 4.6a)'daki elektriksel iletkenlik, sıcaklık aralığında düşüktür ancak geçiş sıcaklığında en yüksek 71×10^4 S/m değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.6b)'deki Seebeck katsayısı, geçiş sıcaklığında minimum -29 μV/K değerine ulaşırken, daha sonra biraz artar ve diğer sıcaklıklar üzerinde nispeten sabit hale gelir. Aksine, Şekil 4.6c)'deki termal iletkenlik, geçiş sıcaklığında en yüksek değeri 3,7 W m^{-1} K^{-1} olan sıcaklık artışı ile artar. Böylece, şekil 4.6d)'de gösterildiği gibi termal iletkenlikteki artıştan dolayı sıcaklıktaki artışla *zT* azalmaktadır. Oda sıcaklığında, en yüksek *zT* yaklaşık 0,27'dir, bu, geçiş sıcaklığında 0,073'e düşer ve ölçümde dikkate alınan en yüksek sıcaklıkta 0,1'a yükselmektedir. Şekil 4.5d)'de, *zT*'nin yüksek değeri nedeniyle Cu_2Se'nin faz geçişinden önce veya sonra çalıştırılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, Cu_2Se'nin faz geçiş bölgesindeki kararsızlığı nedeniyle, geçiş bölgesinde

çalıştırılırsa çok düşük performans elde edilebilmektedir. Benzer şekilde, şekil 4.6d)'de, Ag_2Se'nin oda sıcaklığında yüksek performansa sahip olduğunu ve performansın sıcaklık artışıyla azaldığı görülmektedir



Şekil 4.6: Ag_2Se'nin taşınım özellikleri: a) elektrik iletkenliği, b) Seebeck katsayısı, c) Termal iletkenlik, d) boyutsuz değerlik katsayısı.

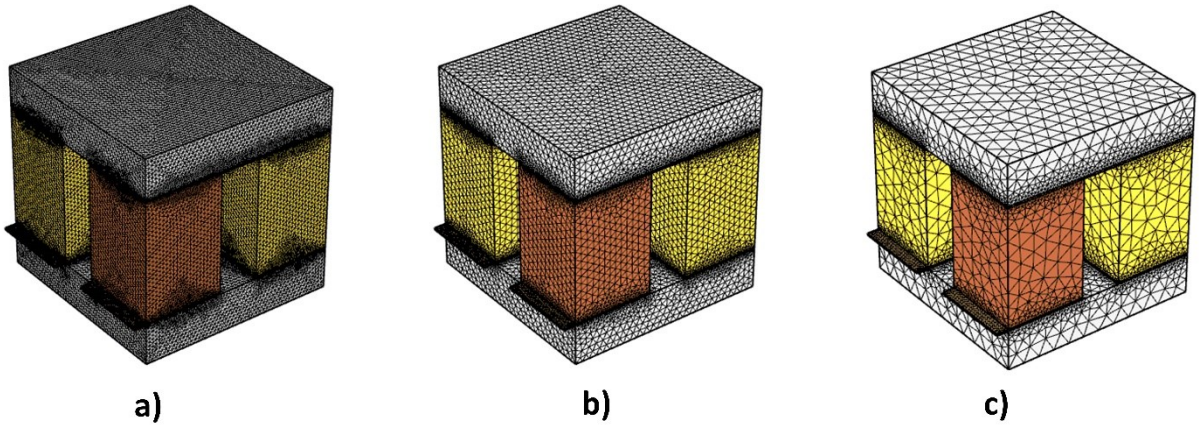
4.1.3. Termoelektrik Modüllerin Modellenmesi ve Optimizasyonu

4.1.3.1. Ağ (Mesh) Bağımsız Testi

Önerilen modelin doğruluğunun ağ yoğunluğundan etkilenmesini önlemek için, model Şekil 4.7'de gösterildiği gibi üç farklı ağ yoğunluğu ile simüle edilmiştir. TE modül ayrıklaştırılıp ve sonlu elaman analizi (finite element analizi (FEA)) çözücü kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Şekil 4.7a) ila Şekil 4.7c)'de TE modülün etki alanı elemanları olarak da bilinen ayrıklaştırma sayısı sırasıyla 1998841, 699381 ve 233423 olarak verilmiştir. Alan elemanlarının sayısı ne kadar yüksekse, sonuçların doğruluğu da o kadar yüksek olmaktadır. Ancak alan elemanlarının sayısındaki artış hesaplama maliyeti artırmaktadır.

Telluryum tabanlı-TE modül, 100 K'lık tek tip bir sıcaklık gradyanı ile simüle edilmiştir ve her benzetim için açık devre gerilim Tablo 4.1'de verilmiştir. Açık devre geriliminin ağ yoğunluğunun değişiminden daha az etkilendiği görülebilmektedir. Bu nedenle, yukarıdaki ağ

yoğunluklarından herhangi biri TE modülünün analizi için doğru bir şekilde kullanılabilmektedir. Burada, son derece ince ağ yoğunluğu seçilmiş ve çalışma boyunca bu yoğunluk kullanılmıştır.



Şekil 4.7: Farklı ağ (mesh) yoğunlukları: a) 1998841 eleman sayısı, b) 699381 eleman sayısı, c) 233423 eleman sayısı.

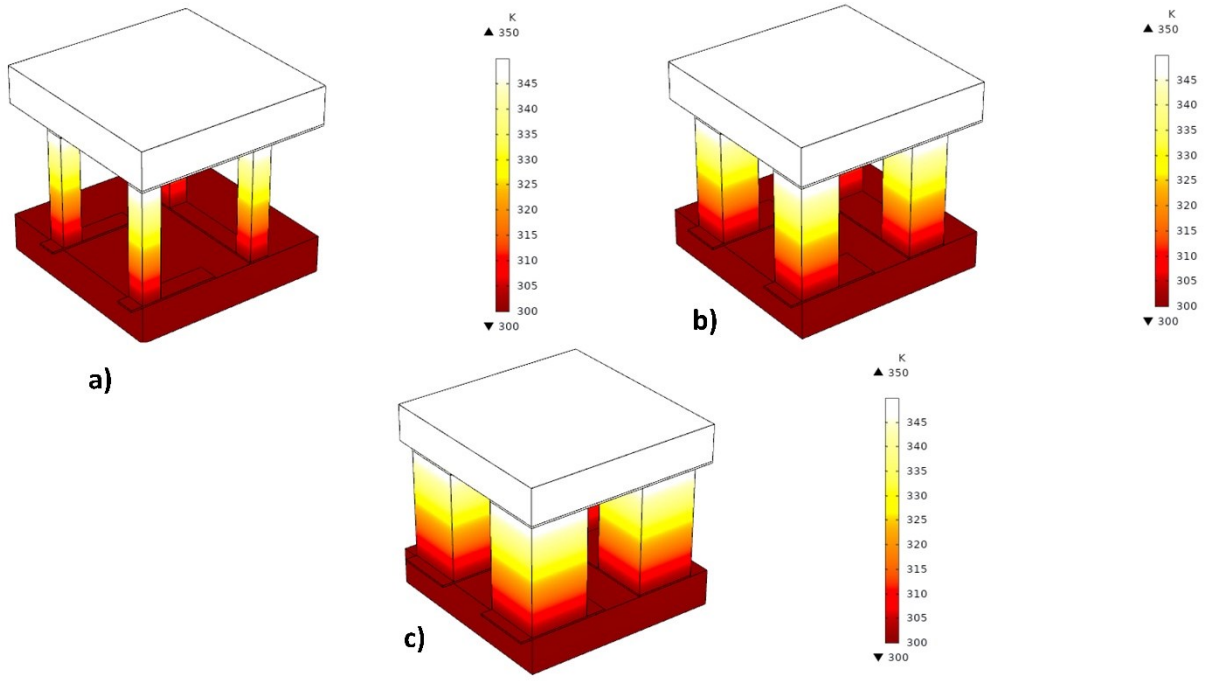
Tablo 4.1: Termoelektrik modül için ağ bağımsız test.

Öğe sayısı	Öğe boyutu	ΔT (K)	V_{out} (V)
1998841	Son derece ince	100	0.0900
699381	Ekstra ince	100	0.0902
233423	ince	100	0.0903

4.1.3.2. Bacağın Alanının Termoelektrik Modülün Çıkış Performansı Üzerindeki Etkisi

Termoelektrik bacağın alanı TE modülün iç direnciyle ters orantılı ve termal iletkenliği ile doğru orantılı olduğundan, TE bacak alanı TE modülünün çıkış performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bacak alanının küçültülmesi iç direnci arttırır, iç direnç cihazdaki akımın akışını azalttığından bu da sistemin genel performansını düşürmektedir. Buna karşın, bacakların yüzey alanının artması termal iletkenliği arttırır, bu da modülün sıcak tarafından soğuk taraflarına ısı transfer miktarını arttırır. Bu nedenle, TE bacaklarının alanı, TE modülün çıkış performansını belirlemede kritik öneme sahiptir. TE modülün alanını artırmanın veya azaltmanın faydası, TE malzemelerin termal ve elektriksel iletkenlikleri ile TE bacaklarının uzunluğuyla belirlenebilmektedir. Küçük alan, yüksek veya düşük termal iletkenlik değerinden bağımsız olarak, ancak elektriksel iletkenliği yüksek olduğunda kullanılabilmektedir. Aynı şekilde elektriksel iletkenliğinin düşük olduğu durumlarda geniş alanlar kullanılmalıdır. TE modülünün özellikleri sıcaklığa göre değiştiğinden, optimizasyon genellikle operasyonel sıcaklık aralığı arasında gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.8, maksimum 50 K sıcaklık gradyanının oluşturulduğu TE modülün uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımını göstermektedir. Üst seramik

ısınan yüzey olarak kabul edilirken alt seramik 300 K sabit sıcaklıkta tutulan soğuk yüzey olarak kabul edilir. Bacakların yüzey alanı Şekil 4.8a)'de ile şekil 4.8b)'de gösterildiği gibi 0.25 mm^2 ile 2.25 mm^2 arasında değişmektedir. Eşit ve düzgün bir sıcaklık dağılımının TE modülde ki bacakların uzunluğu boyunca olduğu gözlemlenebilmektedir. Sıcaklık dağılımının TE bacağının yüzey alanına bağlı olmadığı, daha çok belirleyici faktörlerin arayüzeylerdeki elektriksel iletkenlik ve temas direnci gibi olduğu görülmektedir.

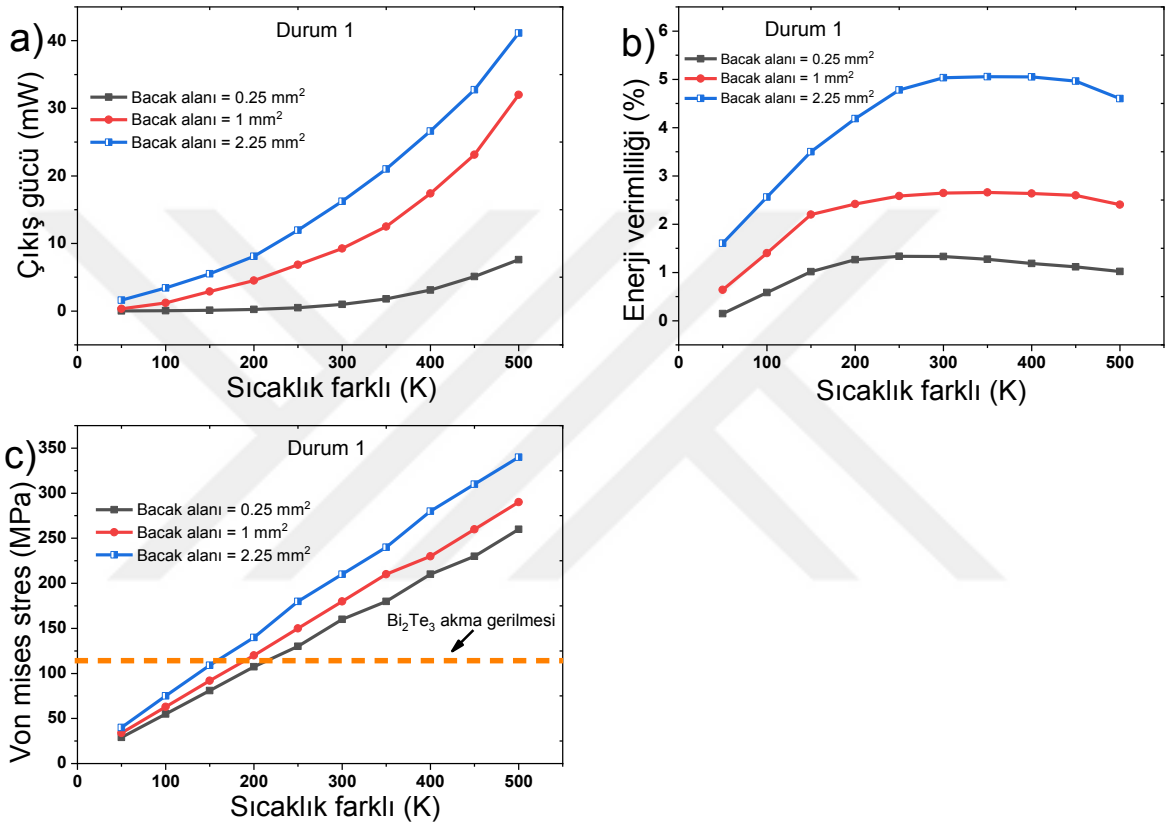


Şekil 4.8: Bacağın farklı alanına sahip TE modülünde sıcaklık dağılımı: a) 0,25 mm^2, b) 1 mm^2, c) 2,25 mm^2.

Bu alt bölümdeki analiz, maksimum 500 K sıcaklık gradyanı ile gerçekleştirildi. TE bacaklarının yüzey alanları değiştirilerek TE modüllerin termoelektrik ve mekanik performansı belirlendi. Modül performansı üç farklı modül durumu üzerinden gerçekleştirildi. Buna göre, modül 1' birinci durumu (durum 1) %100 tellür alaşımlarından oluşan modül, modül 2 yani ikinci durum (durum 2) %50 tellür alaşımlarından ve %50 selenyum alaşımlarından oluşan modül, ve modül 3 yani üçüncü durum (durum 3) ise %100 selenyum alaşımlarından oluşan modül tasarımı kullanıldı. Şekil 4.9a)'de birinci durum yani TE modül 1'in çıkış gücünün sıcaklık gradyanı ve 0,2 Ω yük direnci ile değişimini göstermektir. Buradaki yük direnci değeri, aksi belirtilmedikçe modül 1 analiz etmek için kullanılan yük direncidir. Sıcaklık gradyanı arttıkça, bacakların tüm farklı bölgeleri için çıkış gücü parabolik olarak artmaktadır. Bacak yüzey alanı ile çıkış gücü artışı yani en yüksek güç 2,25 mm^2 bacak alanı ile, en düşük alan 0,25 mm^2 bacak alanı ile elde edilmiştir. Bunun nedeni, modülde ki akımın akışına direnen iç

direncin azalmasıdır. 150 K sıcaklık gradyanında, sırasıyla 0,25 mm^2, 1 mm^2 ve 2,25 mm^2 bacak alanları için 0,125 mW, 2,88 mW ve 5,52 mW çıkış gücüdür. 500 K'lık en büyük simüle edilmiş sıcaklık gradyanındayken, karşılık gelen çıkış gücü sırasıyla 7,6 mW, 32 mW ve 41,14 mW'dir. Şekil 4.9b), modül 1 için bacakların üç alanının enerji dönüşüm verimliliklerinin bir grafiğini sunmaktadır. TE modülün enerji verimliliği, sıcaklık gradyanının ve TE malzemesinin *zT* değerinin artan bir fonksiyonudur. Sıcaklık gradyanı arttıkça, enerji verimliliği, *zT* değerinin düşmeye başlayacağı bir noktaya ulaşılana kadar artmaktadır. Bunun nedeni, *zT* değerinin sıcaklığın bir fonksiyonu olması ve tellür alaşımları için *zT* değerinin oda sıcaklığında yüksek olması ve sıcaklık artışıyla azalmasıdır. 150 K sıcaklık gradyanında, bacak alanları 0,25 mm^2, 1 mm^2 ve 2,25 mm^2 olan modül 1'in enerji verimleri sırasıyla %1,02, %2,2 ve %3,5 olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde, bu verimler 500 K sıcaklık gradyanında %1,02, %2,4 ve %4,6 olmuştur. Çıkış gücünden farklı olarak, maksimum sıcaklık gradyanında enerji verimleri maksimum değildir, bunun nedeni maksimum sıcaklık gradyanında enerji girişinin yüksek olmasıdır. Aynı zamanda çıkış gücü, enerji verimliliğinde bir artışa neden olacak kadar yüksek değildir. Şekil 4.9c), modül 1 için bacakların çeşitli alanlarında maksimum von Mises gerilme varyasyonunu göstermektedir. Termoelektrik jeneratörler, elektrik üretmek için termal enerjinin kullanılması ilkesine dayalı olarak çalıştığından, seramik plakaların yüzeyindeki termal gerilimler, arayüzlerde ve TE bacakları boyunca her zaman mevcuttur. Von Mises gerilimi, sıcaklık gradyanındaki artışla doğrusal olarak artmaktadır. Tellür alaşımları TE malzemelerinin akma gerilimi turuncu çizgi ile gösterilen 112 MPa'dır ve bu gerilim seramik ve bakır plakalarınkinden çok daha azdır. Bu analiz, TE bacaklarındaki izin verilen maksimum termal gerginliğin (von Mises gerilmei) 112 MPa olduğunu ve bu nedenle, termal gerilime izin verilen maksimum gerilmi aştığında bacakların fonksiyonunu kaybedeceğini göstermektedir. Bacakların yüzey alanı ne kadar büyük olursa, TE bacakları boyunca von Mises gerginliğinin o kadar yüksek olduğu görülebilir. 150 K'lik bir sıcaklık gradyanında, 2,25 mm^2 yüzey alanına sahip modül, bacaklarda izin verilen maksimum gerilme çok yakın olan 109 MPa'lık von Mises gerilmesine sahiptir. Sıcaklık gradyanındaki küçük bir artış, izin verilen maksimum değeri aşan termal gerilmee yol açacaktır ve sonucunda TE modülün ömrünü olumsuz etkileyecektir. 0,25 mm^2 ve 1 mm^2 bacak alanlarına sahip modüller nispeten daha yüksek sıcaklıkta çalışabilmektedir. Örneğin, bacak alanı 1 mm^2 olan modül, yaklaşık 185 K sıcaklık gradyanında izin verilen maksimum gerilmeye ulaşırken, 0,25 mm^2 bacak alanı olan modül 210 K sıcaklık gradyanında izin verilen maksimum gerilmeye ulaşmaktadır. Burada, tek tip bir sıcaklık gradyanı için, bacağın yüzey alanındaki azalma ile termal gerilmesinin azaldığı anlaşılmalıdır.

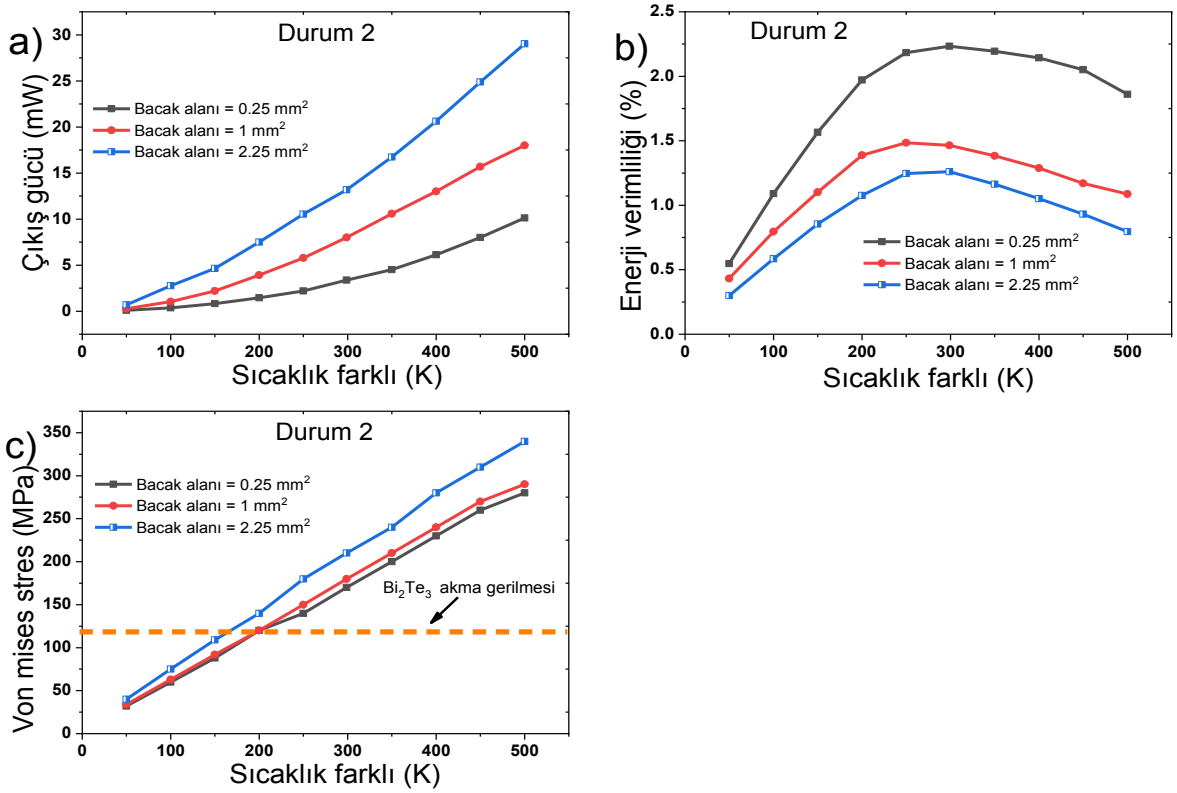
Yani termal gerilime neden olan ısı akısı, bacağın yüzey alanı azaldıkça azalmaktadır. Bir modülün termoelektrik performansı için büyük bir sıcaklık gradyanı oluşturmak faydalı olsa da, büyük sıcaklık gradyanına sahip modül, üzerine uygulanan termal gerilme (stres), modülde onarılamaz hasara neden olabilmektedir. Bu çelişkili ilişkiler, TE modüllerin modellenmesi ve optimizasyonu ihtiyacını zorunlu kılmaktadır.



Şekil 4.9: Ayak alanının değişimi ile durum 1 için TE modülünün performansı a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi.

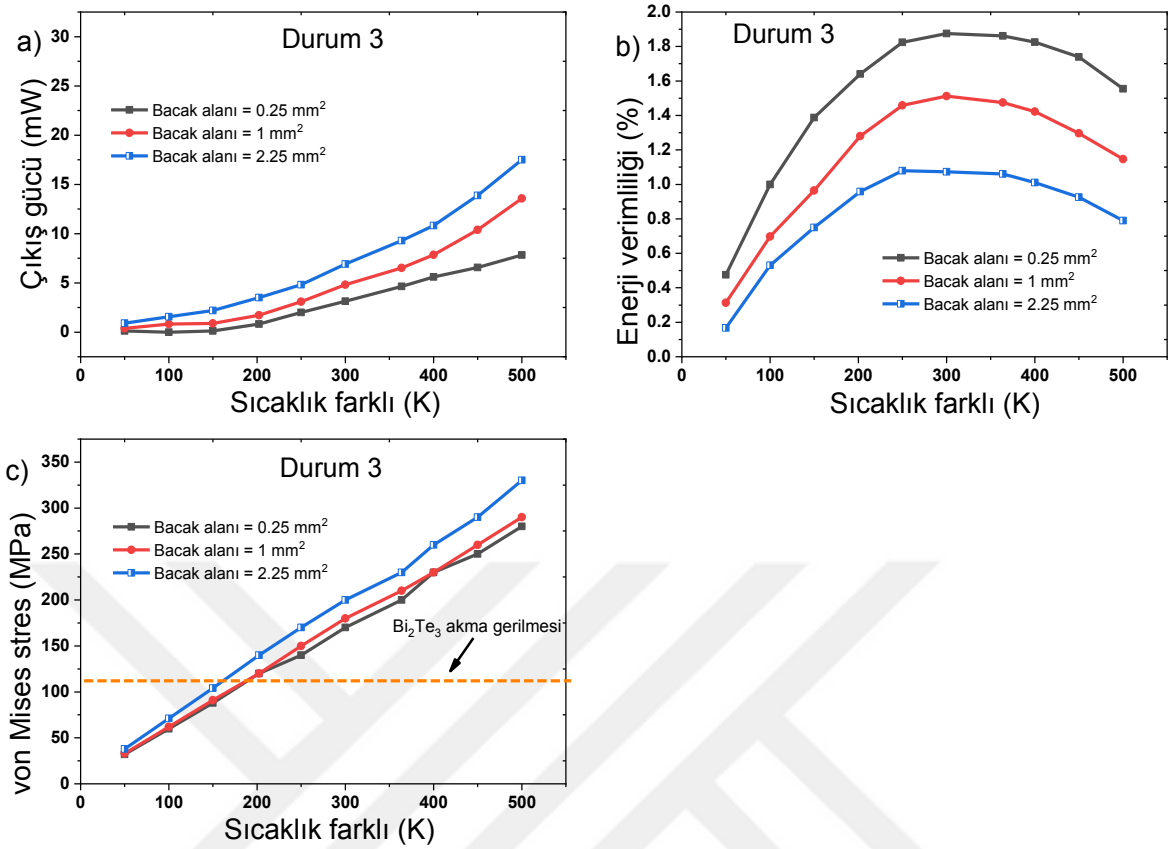
Şekil 4.10'da maksimum termal gerilmenin meydana geldiği performans ve sıcaklık gradyanları, Şekil 4.9'tekinden farklıdır. Termoelektrik performanstaki farklılıklar, kullanılan TE malzemelerdeki farklılıklardan kaynaklanırken, malzemelerin termal genleşme katsayısındaki (CTE) farklılıklar nedeniyle farklı termal gerilme elde edilmektedir. Örneğin, 150 K sıcaklık gradyanında, modül 2'yi analiz etmek için kullanılan yük direnci 0,2 Ω ve 0,25 mm^2, 1 mm^2 ve 2,25 mm^2 bacak alanları, sırasıyla çıkış gücleri 1,08 mW, 2,0 mW ve 4,6 mW'dir. 500 K'lık sıcaklık gradyanındayken, çıkış güçleri sırasıyla 10 mW, 18 mW ve 29 mW'dir. Şekil 4.9a) ve şekil 4.10a) karşılaştırılırsa, 1 mm^2 ve 2,25 mm^2 bacak alanları ile modül 1'in performansının, ilgili bacak alanları ile modül 2'den daha iyi performans gösterdiği

görülebilmektedir. Aksine, 0.25 mm^2 bacak alanına sahip modül 2'nin performansı, aynı bacak yüzey alanına sahip modül 1'in performansından daha üstündür. İlginç bir şekilde, 0,25 mm^2 bacak alanına sahip modül 2' nin enerji dönüşüm verimliliği, Şekil 4.10b)'de gösterildiği gibi 1 mm^2 ve 2,25 mm^2 modül 1'dekinden daha yüksektir. 0,25 mm^2 ve 1 mm^2, 2,25 mm^2 bacak alanları için farklı sıcaklık gradyanlarında sırasıyla %2,33, %1,48 ve %1,25'lik en yüksek enerji verimliliği elde edilmiştir. Şekil 4.10a) ve 4.10b) gösterildiği gibi bacakların yüzey alanının azaltılmasının modülün termoelektrik performansı için faydalı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, iki malzeme grubunun toplam elektriksel iletkenliklerinin değeri ile ilişkilidir. Şekil 4.10c)'de, en geniş bacak alanına sahip modül, tüm sıcaklık gradyanı boyunca en yüksek von Mises gerilimine sahip olan modül olduğu görülmektedir. Düşük sıcaklık gradyanında olmasına rağmen, 0,25 mm^2 ve 1 mm^2 bacak alanlarına sahip iki modülün von Mises gerilme değerleri benzerdir, ancak 200 K'nin üzerindeki bir sıcaklık gradyanında, 0,25 mm^2 bacak alanına sahip modülün von Mises gerilimi, karşılık gelen muadilinden daha düşüktür. Modül 2'nin iyi mekanik performansını korumak için, bacak alanından bağımsız olarak 200 K'nin üzerindeki bir sıcaklık gradyanında çalıştırılmamalıdır. Maksimum çalışma sıcaklıkları oda sıcaklığının 150 ˚C üzerinde olan ticari teluryum bazlı TE modülleri ile uyumludur.



Şekil 4.10: Ayak alanının değişimi ile durum 2 için TE modülün performansı a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi.

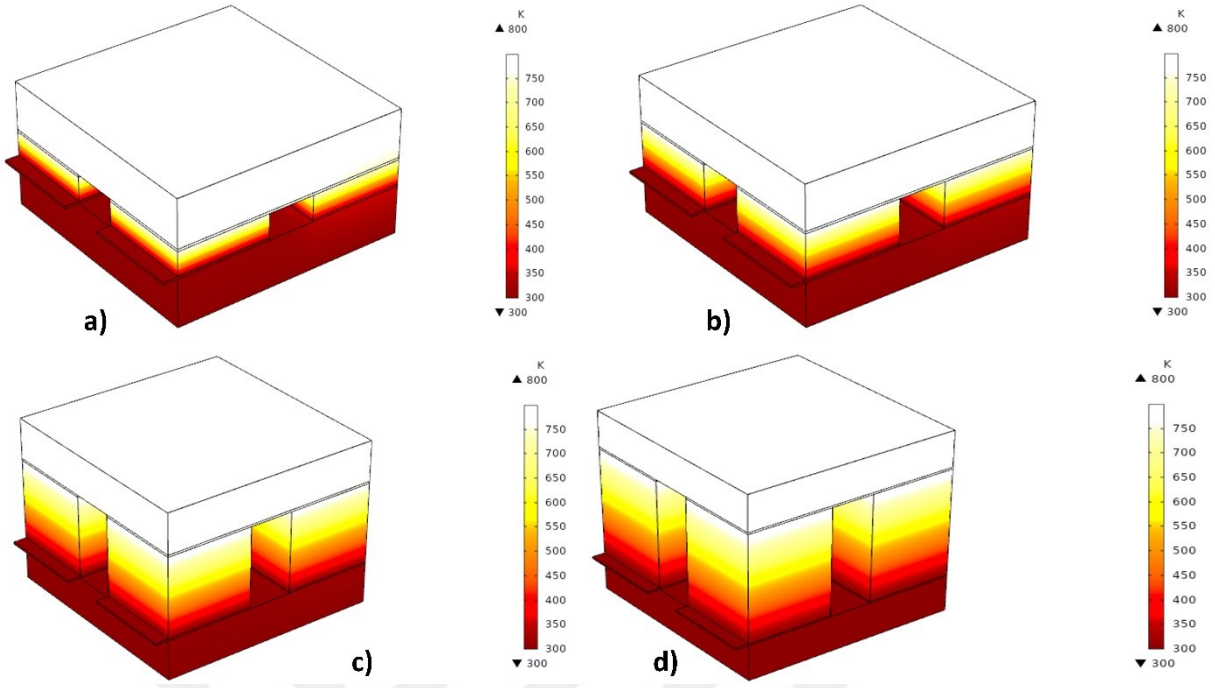
Farklı bacak alanları için modül 3'ün çıkış gücü (selenid bileşiklerinin %100'ü) Şekil 4.11a)'de gösterilmektedir, burada her durumda yük direnci 0,15 Ω'dur ve bu, aksi belirtilmedikçe modül 3'ü analiz etmek için kullanılan yük direncidir. Şekillerde 4.9a) ve 4.10a) görüldüğü gibi alan ne kadar büyük olursa, çıkış gücü o kadar yüksek olur ve çıkış gücü, sıcaklık gradyanındaki artışla parabolik olarak artmaktır. 150 K'lık bir sıcaklık gradyanında, 0,25 mm^2 ve 1 mm^2, 2,25 mm^2 bacak alanına sahip modül 3'ün çıkış gücü sırasıyla 0,12 mW, 0,88 mW ve 2,19 mW'dir. En yüksek çıkış gücü 7,8 mW, 13,6 mW ve 17,5 mW artan sırayla bacak alanları için elde edilmiştir. Bu değerler modül 1 ve 2 ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Şekil 4.11b) de ki grafik şekil 4.10b)'e benzer olup, burada da yani modül 3'ün enerji dönüşüm verimliliği, bacak alanı azaldıkça arttığı görülmektedir. Geniş alanın çıkış gücü, küçük bacak bölgesininkinden daha yüksek olmasına rağmen, bu çıkış gücü, enerji girişine kıyasla verim değerlerini yükseltmek için yeterli değildir. Öte yandan, küçük bacak alanına sahip modülün ürettiği çıkış gücü, enerji girişi ile karşılaştırıldığında, enerji verimliliğinde bir artışa neden olacak kadar yüksek olduğu görülmektedir. Bu davranış, bu durumda Cu_2Se ve Ag_2Se' de TE malzemelerinin özellikleri ile doğrudan bağlantılıdır. Şekil 4.11c), en büyük bacak alanına sahip modülde elde edilen en yüksek gerilme ile modül 3 için von Mises gerginliğini göstermektedir. 150 K sıcaklık gradyanında, 0,25 mm^2 ve 1 mm^2, 2,25 mm^2 bacak alanları için von Mises gerilimi sırasıyla 88 MPa, 91 MPa ve 104 MPa'dır. 0,25 mm^2 bacak alanına sahip modüldeki termal gerilme değerleri, 1 mm^2 bacak alanına sahip modülüne karşılık gelen değerlerine daha yakındır. Ancak 2,25 mm^2 ayak alanına sahip modülde thermal gerilme diğer modüllere göre çok daha fazladır. Bunun nedeni daha önce belirtilmişti. Bu alt bölüme birkaç yorum eklemek gerekirse, kullanılan TE malzemelerinin özelliklerine bağlı olarak, bacak alanının arttırılması modülün termoelektrik performansına faydası olduğu ya da olamayacağı belirlenebilir. Ancak, bir bacağın alanını arttırmak ısı akışını arttırır ve böylece daha fazla termal gerilme oluşur. 300 K soğuk taraf sıcaklığı ile 150 K'ye kadar olan bir sıcaklık gradyanı, bu çalışmada sunulan modüllerin çalışması için güvenli kabul edilebilir. Bir TE modülü yapımında kullanılacak her malzeme için, modül için optimum boyutu elde etmek için optimizasyon yapılmalıdır.



Şekil 4.11: Ayak alanının değişimi ile durum 3 için TE modülün performansı a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi.

4.1.3.3. Bacağın Uzunluğunun Termoelektrik Modülün Çıkış Performansı Üzerindeki Etkisi

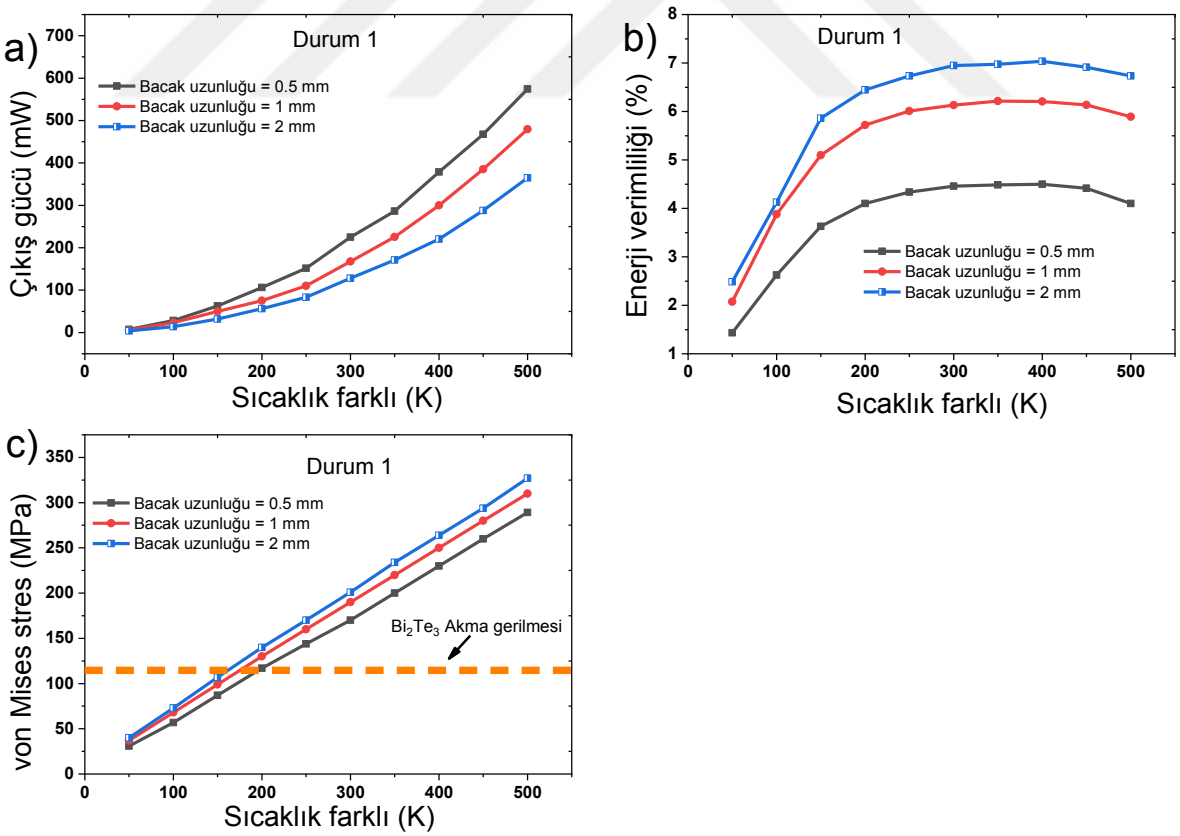
Bu kısımda bacak uzunluğu değiştirilerek uzunluk değişiminin, TE modüllerin termoelektrik ve mekanik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil. 4.12a) ila 4.12d), sırasıyla 0,5 mm, 1 mm, 2 mm ve 3 mm bacak uzunluklarına sahip çeşitli TE modüller arasındaki sıcaklık dağılımlarını sunmaktadır. Üst kısmın sıcak taraf ve alt kısmın soğuk taraf olduğu kabul edilen her bir alt şekilde maksimum 500 K sıcaklık gradyanı gösterilmektedir. Sıcak tarafta uygulanan eşit ısı akışı ve soğuk tarafta eşit ısı dağılımı nedeniyle hem sıcak hem de soğuk taraflarda eşit bir sıcaklık dağılımı görülebilir. Sıcak ve soğuk tarafların sıcaklıklarının görsel olarak incelenmesiyle TE modüllerinin çıkış gücü hesaplanabilir. Alternatif olarak, COMSOL Multiphysics çıkış güçlerini otomatik olarak hesaplayabilir.



Şekil 4.12: Farklı bacak uzunluklarına sahip TE modülde sıcaklık dağılımı: a) 0,5 mm, b) 1 mm, c) 2 mm, d) 3 mm.

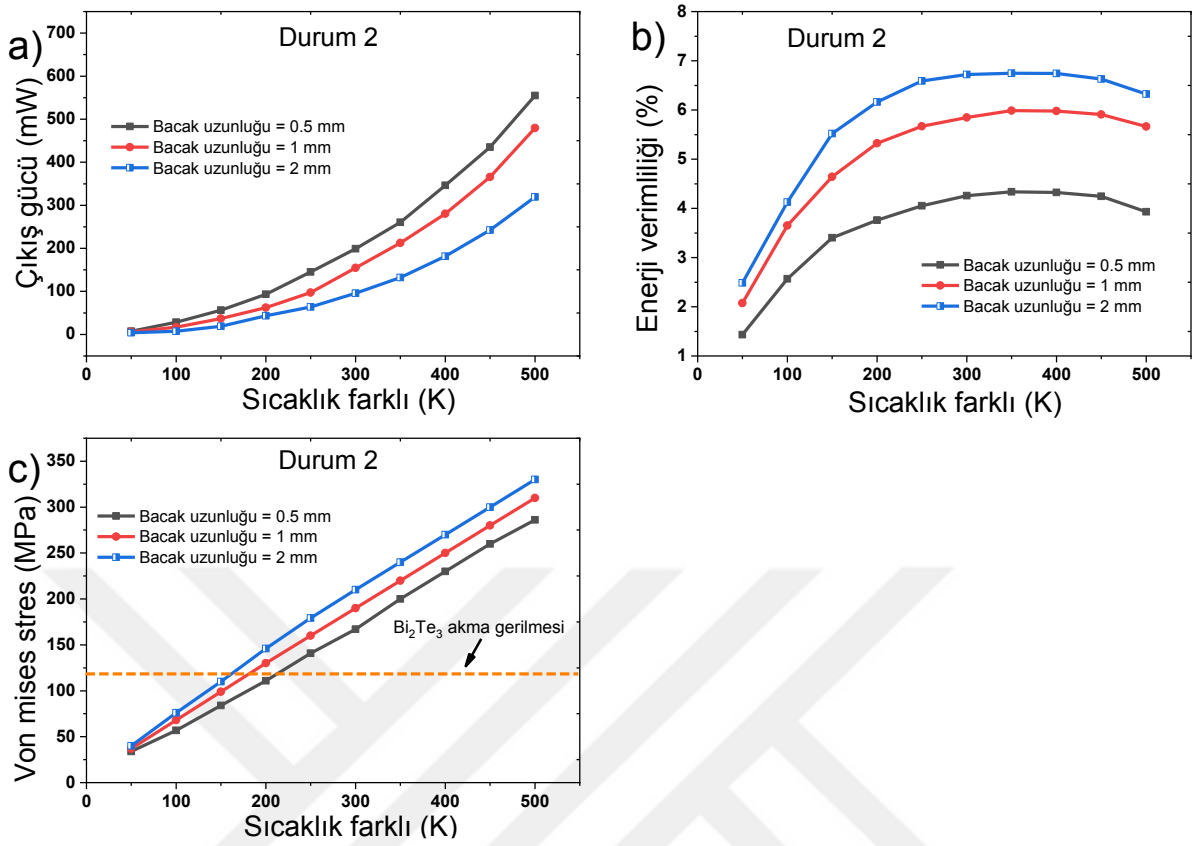
Şekil 4.13a), her durumda yük direncinin 0,2 Ω olduğu 0,5 mm, 1 mm ve 2 mm bacak uzunluğu için sıcaklık gradyanı ile TE modül 1'in çıkış gücünün varyasyonunu sunmaktadır. TE bacağının alanından farklı olarak, bacak uzunluğunun artmasıyla çıkış gücü azalmaktadır. Bunun nedeni, bacağın uzunluğu arttıkça iç direncin artmasıdır. İdeal olarak, çıkış gücü üretimi için bacak uzunluğu mümkün olduğunca kısa olmalıdır, ancak çok kısa bacakların çok dar sıcaklık gradyanları vardır, bunlar pratik durumlarda çıkış gücünü olumsuz etkiler. 0,5 mm'lik bacak uzunluğu boyunca 500 K'ye kadar sıcaklık gradyanları pek oluşturulamaz, bu nedenle daha uzun bacakların kullanılması, daha kısa bacakların kullanılmasından daha pratiktir. Bu alt bölümdeki analiz, bacağın her bir uzunluğu boyunca büyük bir sıcaklık gradyanının oluşturulabileceği varsayımına dayanmaktadır. 150 K sıcaklık gradyanında, sırasıyla 0,5 mm, 1 mm ve 2 mm bacak uzunluğu için 62 mW, 50 mW ve 32 mW çıkış gücü elde edilmiştir. 500 K'lık bir sıcaklık gradyanına, karşılık gelen güç sırasıyla 584 mW, 544 mW ve 364 mW'dir. Şekil 4.13b), Şekil 4.13a)'daki çıkış gücüne göre hesaplanan enerji dönüşüm verimlerini göstermektedir. En uzun bacağın çıkış gücü kısa bacağınkinden daha küçük olmasına rağmen, birincisinin enerji verimliliği ikincisinden daha yüksektir. Enerji verimliliğinin, çıkış gücünün TE modülün sıcak tarafında emilen ısıya oranı olarak tanımlandığı hatırlanmalıdır. Isı absorpsiyon denklemine bakıldığında, joule ısı faktörü nedeniyle bacak uzunluğunun arttırılmasıyla ısı girdisinin toplam değerinin azaltılabileceği fark edilebilir. Isı girdisinin düşük

değerleri, enerji verimliliğinin yüksek değerleri anlamına gelir ve kısa bacak uzunluklarında durum tam tersidir. Her üç ayak uzunluğunda da, enerji verimleri sıcaklık gradyanındaki artışla doğrusal olarak artmakta ve 150 K'lık bir sıcaklık gradyanından sonra enerji verimleri yavaş bir hızda artmakta ve bazı noktalardan sonra enerji verimleri azalmaya başlamaktadır. Bu, TE malzemelerinin oda sıcaklığından oda sıcaklığının 150 K üzerine kadar yüksek performansa sahip olduğunu ve sonrasında performansın düştüğünü göstermektedir. Bu nedenle, modülü bu sıcaklığın üzerinde çalıştırmak modülün performansını önemli ölçüde artırmayacağı anlamına gelir. Bu analiz aynı zamanda Şekil 4.13c)'de gösterildiği gibi termal gerilme analizi ile de desteklenmektedir. Bacak uzunluğu 2 mm olan modül, 150 K'lik bir sıcaklık gradyanının hemen üzerinde izin verilen maksimum 112 MPa gerilmeye ulaşmaktır. Sıcaklık gradyanı ne kadar büyük olursa, von Mises gerilmei de o kadar yüksek olur, ayrıca bacak uzunluğundaki artışla von Mises gerilmei de artar. 500 K'lık en yüksek sıcaklık gradyanında, karşılık gelen von Mises gerilme 0,5 mm, 1 mm ve 2 mm'lik bacak uzunluğu için sırasıyla 280 MPa, 310 MPa ve 330 MPa'dır. Modülün bu sıcaklık gradyanında çalıştırılması, düşük termoelektrik performansa ve aşırı termal gerilme nedeniyle cihaz arızasına yol açacaktır, bundan kaçınılmalıdır.



Şekil 4.13: Bacak uzunluğunun değişimi ile durum 1 için TE modülün performansı a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi.

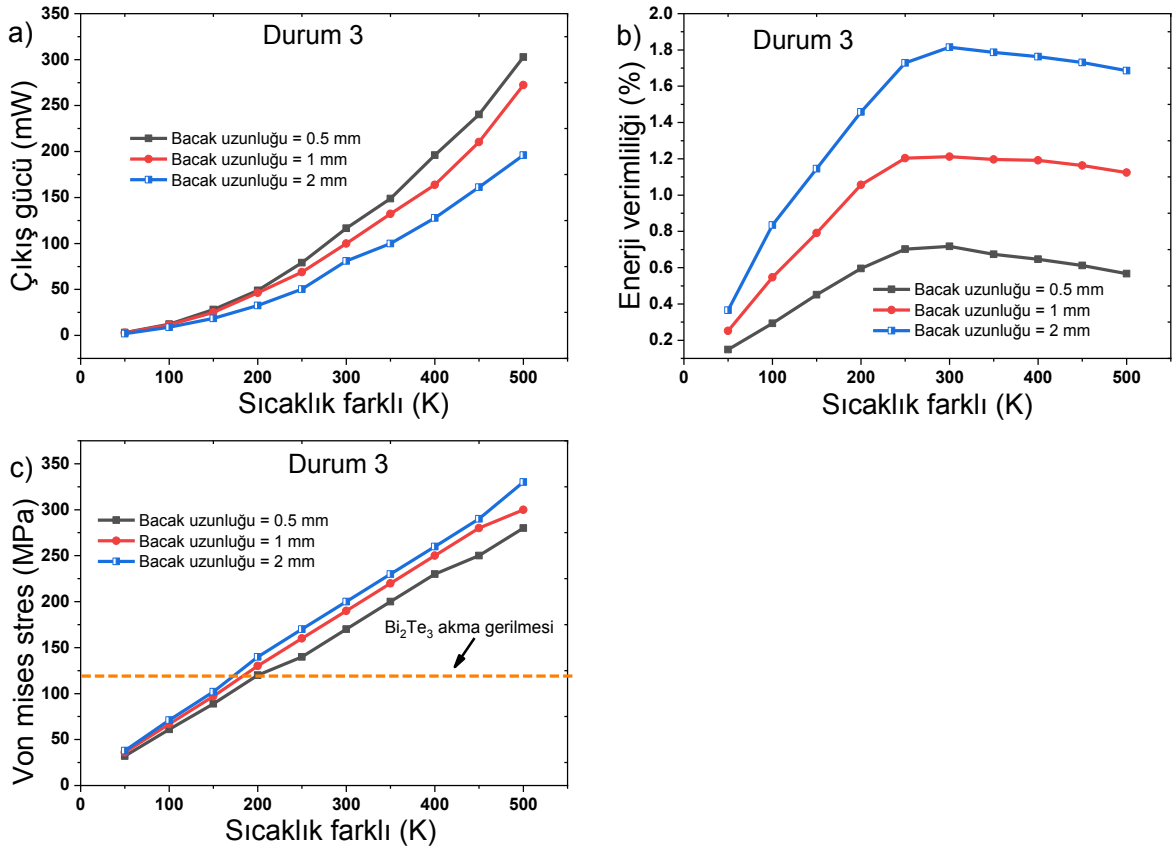
Şekil 4.14'teki modül 2'nin analizi, çıkış gücü, enerji verimliliği ve termal gerilme değerlerinin farklı olması dışında Şekil 4.13'teki modül 1'e benzerdir. Modül 2 de ki durum; 0,5 mm bacak uzunluğuna sahip modül 2 için 150 K ve 500 K sıcaklık gradyanlarında çıkış gücü sırasıyla 50 mW ve 520 mW'dir. Bacak boyu 1 mm ve 2 mm arttığında çıkış güçleri sırasıyla 40 mW, 26 mW ve 490 mW ve 310 mW olmaktadır. Yine kısa bacaklardaki düşük iç direnç nedeniyle çıkış gücündeki artış, Şekil 4.14b)'de görüldüğü gibi enerji verimliliğinde de bir artışa neden olmamakta hatta aksine düşük enerji verimliliğine neden olduğu görülmektedir. Bacak uzunluğunun artmasıyla enerji verimliliği artmakta ve bacak uzunluğu 0,5 mm, 1 mm ve 2 mm olan modül için sırasıyla %4,2, %5,8 ve %6,7, maksimum enerji verimliliği elde edilmektedir. En yüksek enerji verimliliğinin, en büyük sıcaklık gradyanında elde edilmediğine dikkat edilmelidir. En yüksek verimlilik modüllerin yapısındaki malzemelerin en yüksek *zT* değerine ulaşıldığı yani 150 K sıcaklık gradyeninde elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.14c) bacak uzunluğundaki artışın von Mises gerginliğini arttırdığını göstermektedir. 150 K'lık bir sıcaklık gradyanında, 2 mm ayak uzunluğuna sahip modül için izin verilen maksimum gerilmeye ulaşılırken, diğer durumlarda bu gerilme 175 K ve 197 K'da meydana gelmiştir. 500 K'lık bir sıcaklık gradyanında, şekil 4.13c)'deki üç farklı bacak uzunluğu için elde edilen maksimum von Mises gerilimi, şekil 4.14c)'deki karşılık gelen bacak uzunlukları için aynıdır. Genellikle ticari TE modüllerinin ömrü 200.000 çalışma saatidir. Ancak modüllerin izin verilen maksimum sıcaklığın üzerinde çalıştırılması modüllerin ömrünü kısaltmaktadır. Bu nedenle TE modüllerde termal gerilme analizinin yapılması önemlidir.



Şekil 4.14: Bacak uzunluğu varyasyonu ile durum 2 için TE modülün performansı: a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi.

Şekil 4.15a), farklı bacak uzunlukları için modül 3'ün (durum 3) çıkış gücünü göstermektedir. Yine sıcaklık gradyanındaki artış ile çıkış gücü arttığı ve 500 K maksimum sıcaklık gradyeninde , 0,5 mm, 1 mm ve 2 mm ayak uzunluğu için sırasıyla 302 mW, 272 mW ve 196 mW maksimum değerler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.15b)'ye daha fazla bakıldığında, üç farklı bacak uzunluğunun tümü için enerji dönüşüm verimliliklerinin grafikleri görülebilmektedir. Burada da en uzun bacağın enerji verimliliği diğer iki duruma göre daha yüksek olup, en az enerji verimliliği en kısa bacağa sahip modülde elde edilmektedir. Her üç bacak uzunluğu için de en yüksek enerji verimliliği sırasıyla 0,5 mm, 1 mm ve 2 mm bacak uzunluğuna sahip modül için %0,72, %1,21 ve %1,81 ile elde edilmiştir. Şekiller 4.13, 4.14 ve 4.15 karşılaştırıldığında, her durumda Şekil 4.13a)'daki çıkış güçlerinin Şekiller 4.14 ve 4.15'deki karşılık gelen çıkış güçlerinden daha yüksek olduğu görülebilmektir. Benzer şekilde, şekil 4.13b)'deki enerji dönüşüm verimlilikleri, şekiller 4.14b) ve 4.15b)'deki karşılık gelen enerji verimliliklerinden daha yüksektir. Bunun nedeni, şekil 4.13'teki TE malzemelerin diğer iki şekile göre daha üstün performansa sahip olmasıdır. En düşük termoelektrik performanslar Şekil 4.15'te elde edilmiştir ve bu Şekiller 4.5d) ve 4.6d)'te gösterildiği gibi Cu_2Se ve Ag_2Se

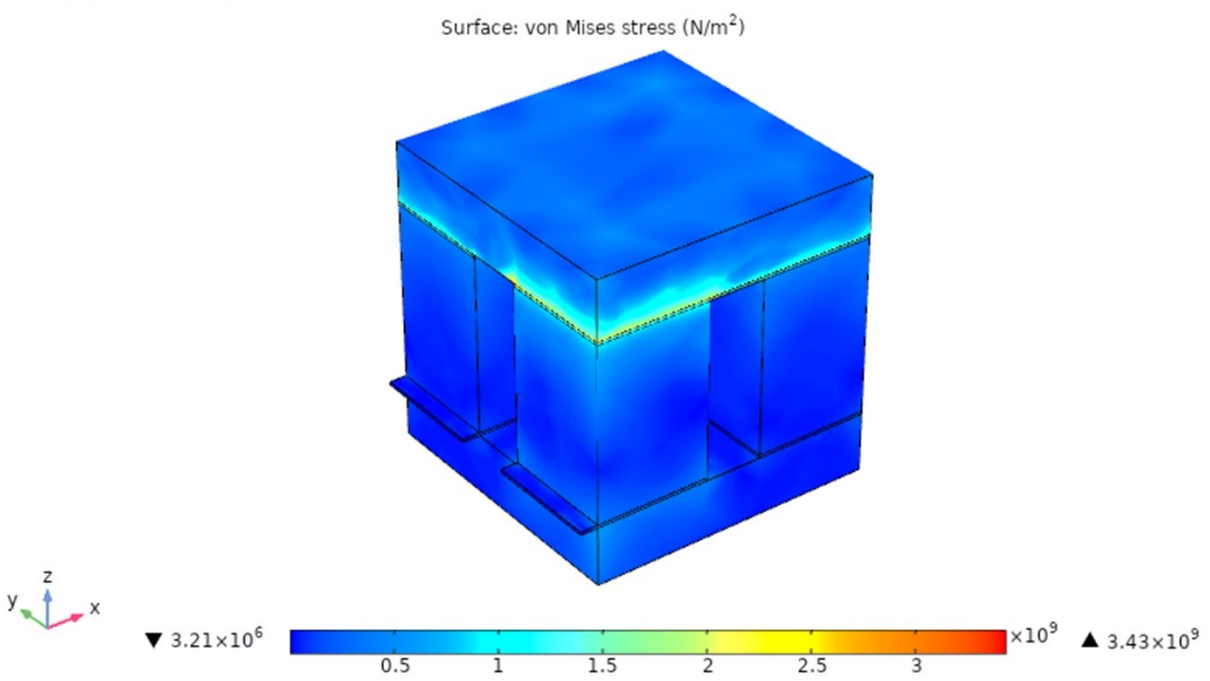
malzemeleri için elde edilen en düşük *zT* değerlerinden kaynaklanmaktadır. Cu_2Se ve Ag_2Se, benzer termal genleşme katsayısına (CTE) sahip oldukları için birlikte eşleştirilebilir. Cu_2Se ve Ag_2Se'nin CTE değerleri, $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$ ve $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$'nin CTE değerlerine kıyasla bakır elektrotun değerlerine daha yakındır. Bakır elektrotunkine yakın değerlere sahip TE malzemeler, bakır elektrotun CTE değerinden çok farklı CTE değerlerine sahip TE malzemelere kıyasla daha az termal gerilmee maruz kalmaktadır. Bu nedenle, Şekil 4.15c)'deki en yüksek termal gerilme, Şekil 4.14c) ve Şekil 4.13c)'deki termal gerilmelerden sırasıyla 6 MPa ve 10 MPa daha azdır.



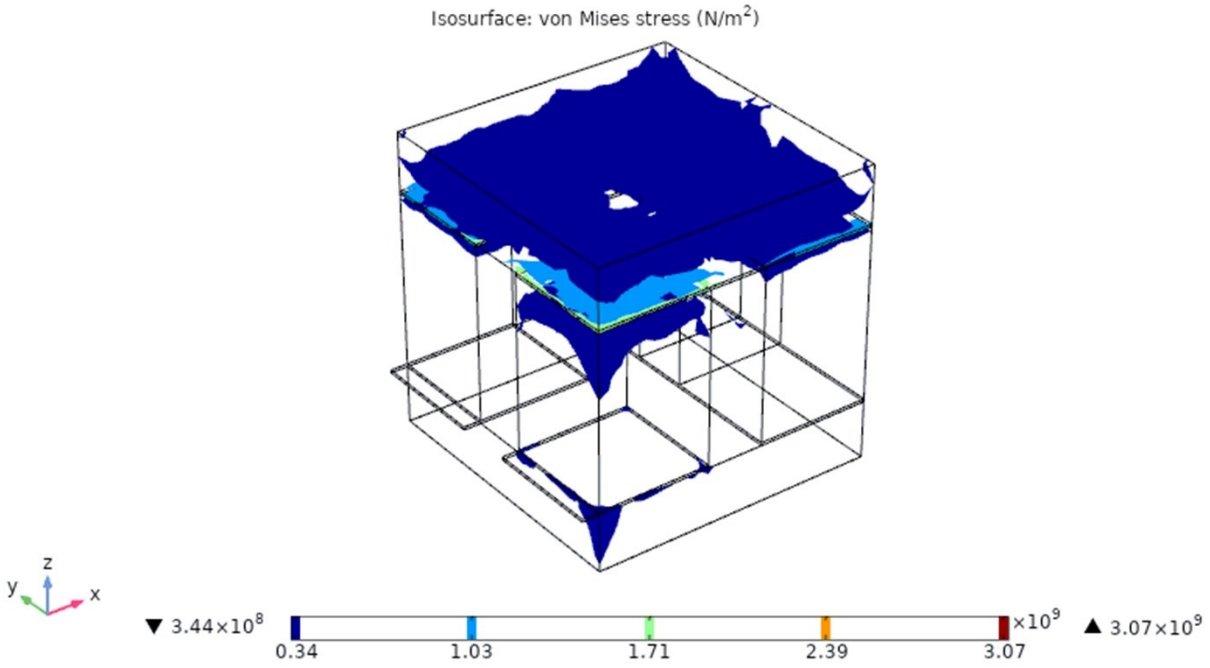
Şekil 4.15: Bacak uzunluğu varyasyonu ile durum 3 için TE modülün performansı: a) çıkış gücü, b) enerji dönüşümü verimliliği, c) von Mises gerilimi.

Şekil 4.16, 500 K sıcaklık gradyanında TE modüldeki von Mises geriliminin dağılımını göstermektedir. Bu sıcaklık gradyanında, TE modüldeki termal gerginliğin büyük çoğunluğu yaklaşık 0,5 GPa olduğu ve bunun ağırlıklı olarak sıcaklığın uygulandığı sıcak yüzeydeki bakır elektrotlar ile bacaklar arasındaki arayüzde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu geriliminin dağılımına bakıldığında en yüksek von Mises gerilimi bakır elektrotta ve 3.43 GPa' değerinde olduğu, geri kalan yaklaşık 1 GPa gerilmenin ise bakır elektrot ve TE bacak arasındaki arayüzde

oluştuğu görülmektedir. Hem bakır elektrot hem de seramik plaka, bu büyüklükte von Mises gerilimine dayanabilir görünsede, TE ayakların bu kadar yüksek bir termal gerilime maruz kaldığında dayanması mümkün olamayacak, kırılma çatlama ve dağılma ihtimali oldukça yüksek olacaktır. Şekil 4.17'de, 500 K'lik bir sıcaklık gradyanında eş yüzey von Mises gerilmesini göstermektedir. Seramiğin sıcak tarafında ve ayrıca TE bacaklarının sıcak tarafında yüksek bir termal gerilme konsantrasyonu görülebilir. TE bacaklarında kullanılan TE malzemeler farklı CTE değerlerine sahip olduğu için bacaklardaki von Mises gerilimi bir bacaktan diğerine farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar, aşağıdaki alt bölümde tartışıldığı gibi TE modülün sıcak tarafına düzgün olmayan bir ısı akışı uygulanarak daha da büyük bir hale getirilebilir.



Şekil 4.16: von Mises gerilme 500 K sıcaklık gradyan elde edilir.

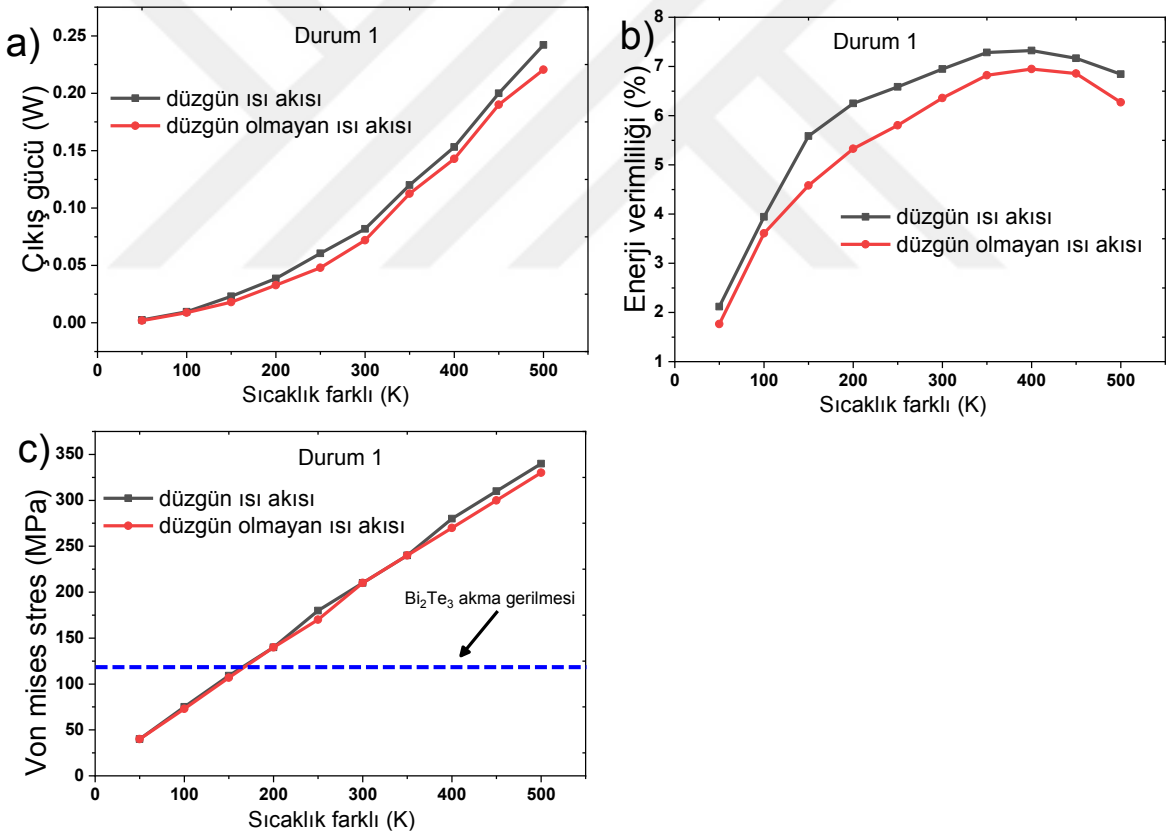


Şekil 4.17: von Mises gerilmenin 500 K sıcaklık gradyanında elde edilen TE modülünde konsantrasyonu.

4.1.3.4. Düzgün ve Düzgün Olmayan Isı Akısının Termoelektrik Modüllerin Çıkış Performansına Etkisi

İdeal durumda hem rijit hem de esnek TE modüller için eşit ve homojen bir ısı akışı modül yüzeyinde sağlanmalıdır. Ancak bu çoğu zaman pek mümkün değildir. Zira TE modülün sıcak tarafındaki ısı akışı genel olarak tüm yüzeye homejen olarak dağılmaz. Bunun nedeni, ısı kaynağı ile TE modülün sıcak tarafı arasındaki kusurlu temasların bunu engellemesi veya ısı kaynağının homojen ısı sağlayamaması olabilir. Örneğin, rijit bir TE modül kavisli bir ısı kaynağı üzerine yerleştirildiğinde veya ısı kaynağının yüzeyi TE modülün sıcak yüzeyini tamamen örtmediğinde homojen olmayan bir ısı akısı oluşmaktadır. Bu kısımda TE modülün (TEJ) hem düzgün hem de düzgün olmayan ısı akışı altındaki performansı belirlenmiştir. Şekil 4.18a), hem düzgün hem de düzgün olmayan ısı akışları için 500 K'lik bir sıcaklık gradyanı üzerinden modül 1'in (bacak boyutu 3 × 2 × 2 mm^3) çıkış gücünü göstermektedir. Her durumda, TE modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık gradyanındaki artışla çıkış gücü katlanarak artmaktır. Aynı zamanda, düzgün ısı akışına sahip TE modülün performansının, düzgün olmayan ısı akışına sahip modülün performansından daha yüksek olduğu da gözlemlenebilmektedir. Sıcaklık gradyanı arttıkça, düzgün ısı akışına ve düzgün olmayan ısı akışına sahip TE modülün performansı arasındaki farklar kademeli olarak artmaktır. En yüksek çıkış gücü sırasıyla 242 mW ve 220,5 mW olarak düzgün ısı akışının olduğu ve düzgün ısı

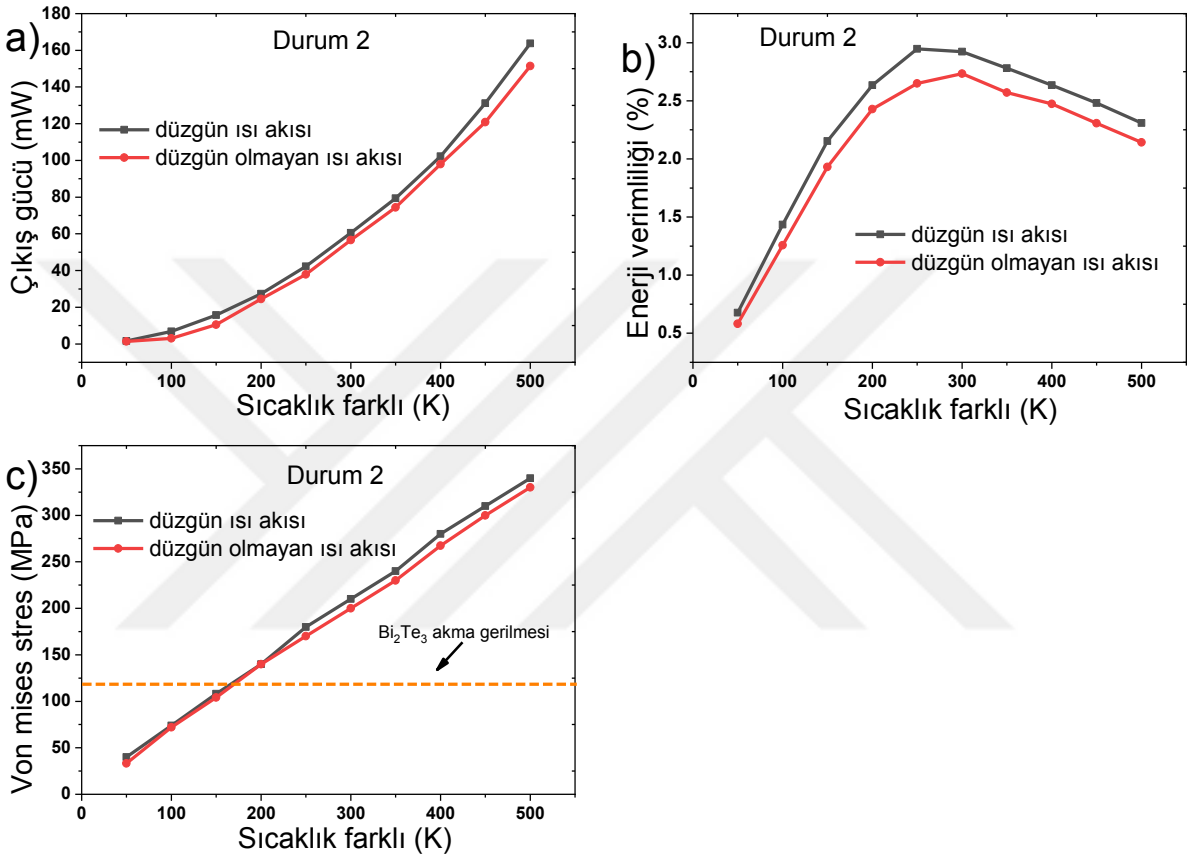
akışının olmadığı modüllerde elde edilmiş değerlerdir. Şekil 4.18b), düzgün ve düzgün olmayan ısı akışları için modül 1'in enerji dönüşüm verimliliğini göstermektedir. Enerji dönüşüm verimliliği, TE malzemelerinin sıcaklığa bağlı özellikleri tarafından belirlenen maksimum değere ulaşılana kadar sıcaklık gradyanındaki artışla artar. Enerji dönüşüm verimliliğinde maksimum enerji dönüşüm verimliliği noktasının ötesindeki daha fazla artış, enerji dönüşüm verimliliğinde bir düşüşe neden olur. En yüksek enerji verimliliği sırasıyla %7,32 ve %6,94'lük değerler homojen ısı akışına sahip ve homojen olmayan ısı akışına sahip modüller için elde edilmiştir. TE modülün sıcak tarafının sıcaklığının yoğunluğu, düzgün olmayan ısı akısı ile karşılaştırıldığında düzgün bir ısı akısı uygulandığında daha yüksektir. Bu durum Şekil 4.18 c) de de gösterildiği gibi, düzgün ısı akısına sahip modülde homojen ısı akışının olmadığı modüle kıyasla biraz daha yüksek bir von Mises gerilimi oluşmaktadır. Her iki durumda da maksimum von Mises gerilimi 150 K'lik bir sıcaklık gradyanının hemen üzerinde aşılmaktır.



Şekil 4.18: Düzgün ve düzgün olmayan ısı akışına sahip durum 1 için TE modülün performansı: a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi.

Şekil 4.19a) ila 4.19c)'de modül 2 için yapılan benzer analizleri göstermektedir. Şekil 4.19a)'daki çıkış gücünün davranışı, Şekil 4.18a)'dakine benzer, düzgün ve düzgün olmayan ısı akışlarına sahip modül 2'nin çıkış gücü, modül 1'inkinden sırasıyla %32,23 ve %31,5 daha

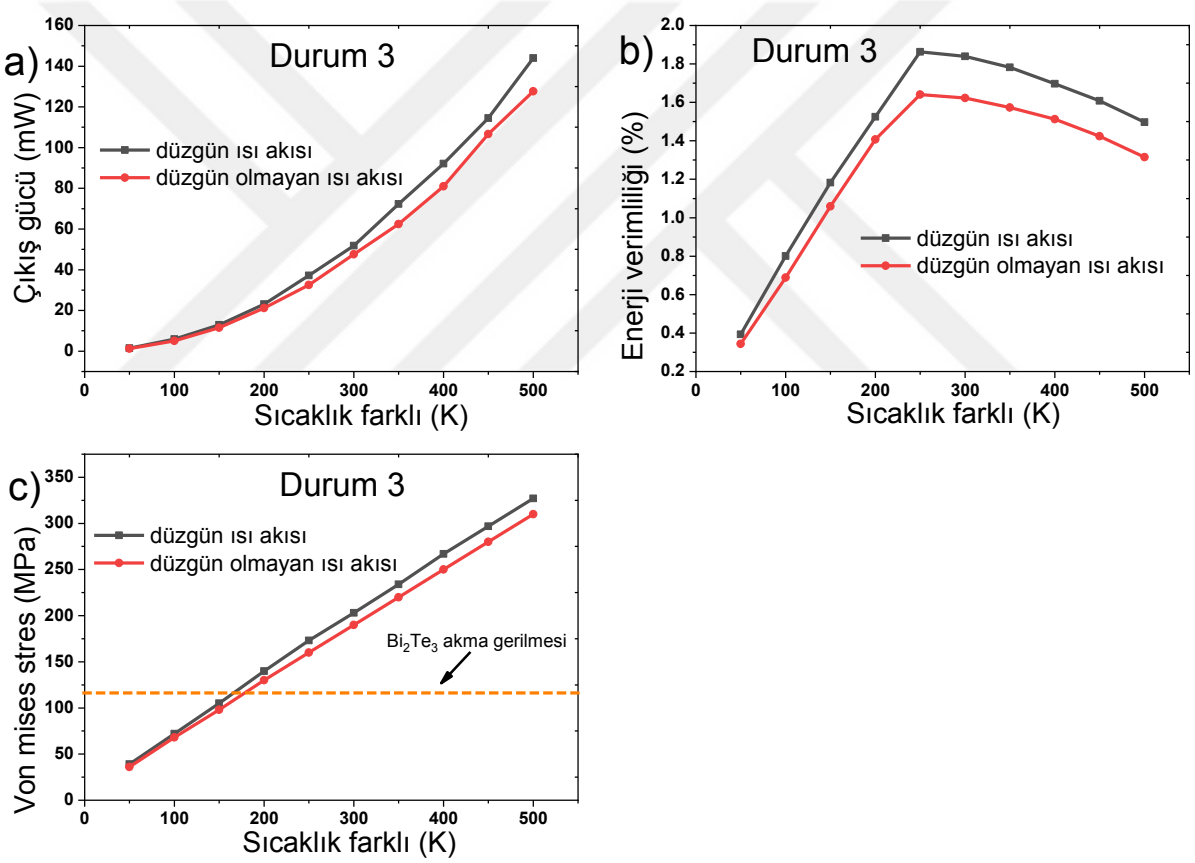
azdır. Benzer şekilde, düzgün ve düzgün olmayan ısı akışlarına sahip modül 2'nin enerji dönüşüm verimliliği de, modül 1'inkinden sırasıyla %60 ve %60,1 daha düşüktür. Benzer şekilde, düzgün ve düzgün olmayan ısı akışları ile modül 2'deki maksimum von Mises gerilimi modül 1'dekinden biraz daha azdır. Yine, her iki durumda da izin verilen maksimum von Mises gerilimi, 150 K'lik bir sıcaklık gradyanından hemen sonra gerçekleşmektedir.



Şekil 4.19: Düzgün ve düzgün olmayan ısı akışı ile durum 2 için TE modülün performansı: a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi.

Modül 3'ün düzgün ve düzgün olmayan ısı akışları için çıkış güçleri Şekil 4.20a)'da gösterilmiştir. 150 K'lik bir sıcaklık gradyanında, düzgün ve düzgün olmayan ısı akışları için çıkış güçleri sırasıyla 12,98 mW ve 11,56 mW'dir. 500 K'lık bir sıcaklık gradyanındayken, karşılık gelen çıkış güçleri sırasıyla 144 mW ve 128 mW'dir. Hem düzgün hem de düzgün olmayan ısı akışları için enerji dönüşüm verimleri şekil 4.20b)'de verilmiştir. Düzgün olmayan ısı akışına kıyasla, düzgün ısı akışı için daha yüksek enerji verimliliği bulunmaktadır. 250 K'lik bir sıcaklık gradyanında, düzgün ve düzgün olmayan ısı akışları için sırasıyla %1,86 ve %1.64'lük maksimum enerji verimleri elde edilmiştir. Bu enerji verimleri, 500 K'lik bir sıcaklık gradyanında sırasıyla %1,5 ve %1,3'dür. Şekil 4.20c), aynı zamanda, düzgün ısı akısına sahip

TE modülde ki von Mises geriliminin, düzgün olmayan ısı akısına sahip modülünkinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Düzgün ısı akışına sahip modül, 143 K'lik bir sıcaklık gradyanında 112 MPa'ya (tellürid bileşikleri için izin verilen maksimum gerilme sınırıdır) ulaşırken, düzgün olmayan ısı akışına sahip modül, 168 K'lik bir sıcaklık gradyanında izin verilen maksimum gerilime ulaşmaktadır. Bu çalışma, TE modülünün sıcak tarafına düzgün olmayan ısı akışına kıyasla düzgün bir ısı akışı uygulandığında daha yüksek termoelektrik çıkış gücü ve verimin elde edilebileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, TE modülün sıcak tarafına düzgün olmayan bir ısı akışı uygulandığında, düzgün ısı akışına kıyasla biraz daha az termal gerilimi elde edilebilmektedir. Düzgün ve düzgün olmayan ısı akışları için termoelektrik performans ve termal gerilme arasındaki farklar, sıcaklık gradyanına göre değişebilmektedir.

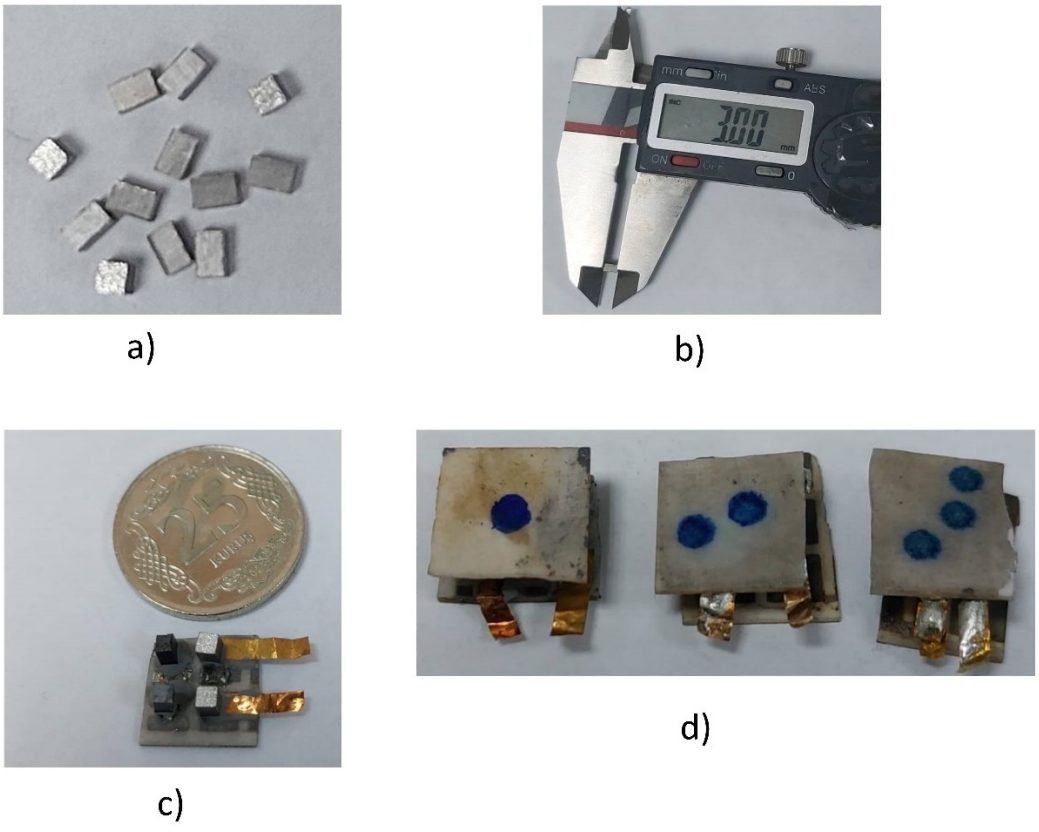


Şekil 4.20: Düzgün ve düzgün olmayan ısı akışı ile durum 3 için TE modülün performansı: a) çıkış gücü, b) enerji dönüşüm verimliliği, c) von Mises gerilimi.

4.1.4. Teorik Modellerin Deneysel Doğrulaması

3 × 2 × 2 mm^3'lük dikdörtgen bacaklar, şekil 4.21a)'da gösterildiği gibi TE malzemelerinin karakterizasyonundan sonra yapılmıştır; bu boyutun seçilmesi COMSOL Multiphysics'te yürütülen optimizasyon sonucunda ortaya çıkmıştır. Bacakların yüzey alanı ne kadar büyük

olursa, çıkış gücü o kadar yüksek ve bacak uzunlukları ne kadar kısa olursa, düşük iç direnç nedeniyle çıkış gücünün o kadar yüksek olduğu önceki bölüm analiz sonuçlarında görülmüştür. Ancak, kısa bacaklar düşük enerji dönüşüm verimliliğine sahiptir ve kısa bacaklı TE modülde büyük sıcaklık gradyanları oluşturulamaz. Aksine, daha uzun bacaklar yüksek iç dirence ve nispeten yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahiptir. TE modüllerin atık ısıyı elektrik enerjisine dönüştürmesi amaçladığından, enerji dönüşüm verimliliği büyük önem taşımaktadır. Böylece yüksek enerji dönüşüm verimliliği sağlayan optimizasyon seçilmiştir. Şekil 4.21b), ölçülen bacak uzunluklarından birini gösterirken, Şekil 4.21c) imalat sırasında modüllerden birini ve bir türk madeni parasına kıyasla boyutunu göstermektedir. Bakır elektrotlar, serigrafi yöntemiyle seramik plakalar üzerine biriktirilirken, lehim ve TE bacakları seramik plakalar tarafından sandviçlendi ve bir konveksiyon fırınında ısıl işlemle birleştirildi. Son olarak, Şekil 4.21d)'de, modül 1'in üst seramik plaka üzerinde mavi bir nokta ile gösterilen saf tellürit bileşiği olduğu üç TE modülünü sunmaktadır. Modül 2, tellür bileşikleri ve selenit bileşiklerinin her birinin %50'sini içerir ve seramik plaka üzerinde iki mavi nokta ile gösterilmektir. Modül 3, %100 selenit bileşiklerine sahiptir ve seramik plaka üzerinde üç mavi nokta ile gösterilmektir.



Şekil 4.21: TE modüllerinin imalatı : a) thermoelektrik bacaklar, b) bacak uzunluğu ölçülmekte, c) Üretim sırasında TE modül, d) üç farklı TE modülü.

Ölçümler, her biri ±0.1 ˚C hassasiyete sahip K-tipi termokupların önceden kalibre edildiği ve TE modüllerin sıcak ve soğuk taraflarının sıcaklıklarını ölçmek için yerel ölçüm sistemi kullanılmıştır. Ölçüm sisteminin bakır bloğunun soğuk tarafını soğutmak için su soğutmalı sistem kullanılmıştır. Suyun akış hızı 1 L/dk ve sıcaklığı 23 ˚C'dir. Akımı %1,0 doğrulukla ve gerilim %0,5 doğrulukla ölçmek için bir dijital multimetre (TP4000ZC) kullanıldı. Çıkış gücünün veya enerji verimliliği ölçümünün (M) $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$ bağımsız değişkenlerine bağlı olduğu varsayıldı. Ölçümlerin belirsizliği (δM) şu şekilde verilir (Moffat, 1988):

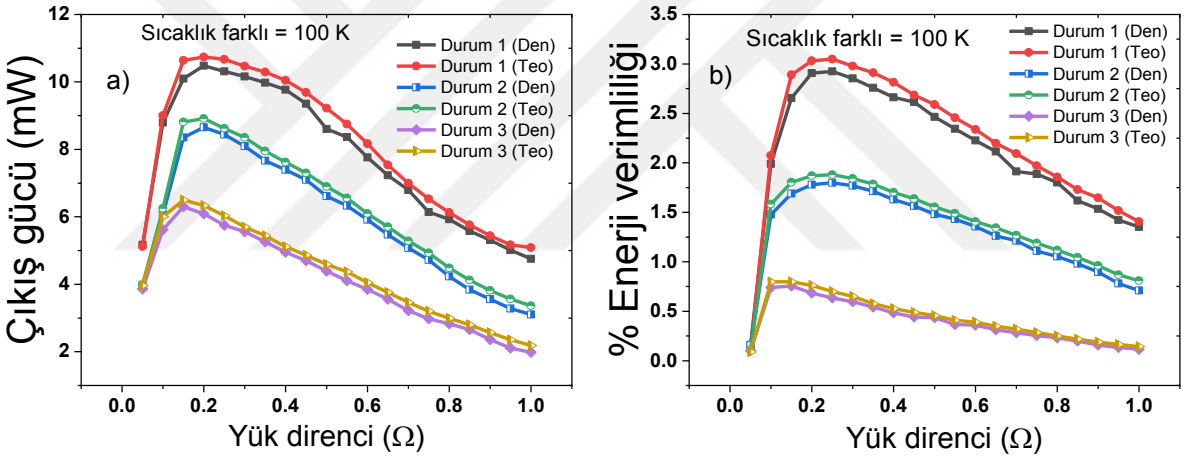
$$\delta M = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \delta x_i\right)^2} \tag{4.1}$$

burada $M = f(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n)$, δx_i bağımsız değişkenlerin belirsizliğidir.

Çıkış gücü ve enerji verimliliğine ilişkin maksimum belirsizlikler ise sırasıyla %4,8 ve %7,3 olarak bulunmuştur.

Şimdi teorik modeller, Şekil 4.22'de gösterildiği gibi deneysel ölçümlerle doğrulanmaktadır. Maksimum çıkış gücünü belirlemek için, 100 K sıcaklık gradyanına sahip her modül için 0,05 Ω ila 1 Ω aralığında bir parametrik yük direnci taraması yapıldı. Yük direnci olduğunda TE modüllerinin maksimum çıkış gücü oluşur TE modülünün iç direncine eşittir. Şekil 4.22a)'daki parametrik taramadan, modül 1 (Den), modül 2 (Den) ve modül 3 (Den) için ölçülen maksimum çıkış gücü 0,2 Ω, 0,185 Ω ve 0,15 Ω sırasıyla yük dirençlerinde elde edilmiştir. Bu durum Modül 3'ün maksimum güç noktasına diğer iki modülden daha erken ulaştığı anlamına gelmektedir. Modül 1, 2 ve 3 için ölçülen maksimum çıkış güçleri sırasıyla 10,48 mW, 8,65 mW ve 6,3 mW'dir. Modül 1 (Teo), modül 2 (Teo) ve modül 3 (Teo) için teorik maksimum çıkış güçleri, karşılık gelen ölçülen maksimum çıkış güçlerinden %6,3, %4,7 ve %3,2 daha yüksektir. Her modül için, yük direnci iç direncin üzerine çıktıkça maksimum çıkış gücü azalmaktır. Çok daha yüksek yük direncinde, yük akımı aşırı derecede küçülür ve çıkış gücü sıfır olma eğilimindedir. Bu sonuç hem deneysel olarak ölçülen hem de teorik olarak hesaplana güç çıkışları için geçerlidir. Modül 1'deki çıkış güçlerinin, modül 2 ve 3'teki çıkış güçlerinden daha yüksek olduğu da gözlemlenebilmektedir. TE modülün iki grupnin kullanıldığı modül 2'nin ölçülen maksimum çıkış gücü, modül 1'in ölçülen maksimum çıkış gücünden %17,46 ve modül 2'nin ölçülen maksimum çıkış gücü, modül 3'ün ölçülen maksimum çıkış gücünden %27,17 daha yüksektir. Modül 3'ün ölçülen maksimum çıkış gücü, modül 1'in karşılık gelen ölçülen çıkış gücünden %39,89 daha düşüktür. Maksimum enerji verimliliği, maksimum çıkış gücü ile aynı noktada meydana geldi şekil 4.22b)'de gösterilmiştir. Bu maksimum enerji

verimliliklerinin optimum enerji verimlilikleri ile aynı olmadığına dikkat edilmelidir. Optimum enerji dönüşüm verimliliği, bir modülün en yüksek enerji dönüşüm verimliliği iken, maksimum enerji verimliliği, maksimum çıkış gücü noktasında elde edilen enerji dönüşüm verimliliğidir. Modül 1, 2 ve 3 için ölçülen ve teorik enerji verimlilikleri arasındaki ortalama tutarsızlıklar sırasıyla %7,2, %5,4 ve %2,1'dir. Bu sonuçlar, teorik modellerin çıktı sonuçlarının kabul edilebilir aralıkta olduğunu ve TE modüllerini doğru bir şekilde analiz etmek için kullanılabileceğini göstermesi açısında oldukça önemlidir. Enerji dönüşüm verimleri, maksimum çıkış gücü grafikleriyle benzer grafiklere sahiptir, bunun nedeni çıkış gücünün, enerji dönüşüm verimliliğinin bağlı olduğu iki parametreden biri olmasıdır. Modül 1'in maksimum ölçülen enerji verimliliği %2,92'dir ve modül 2 ve 3'ün buna karşılık gelen enerji verimlilikleri sırasıyla %38,4 ve %74,1 daha yüksektir. Modül 2'nin maksimum ölçülen enerji verimliliği, modül 3'ün karşılık gelen enerji verimliliğinden %57,8 daha yüksektir.



Şekil 4.22: TE modüllerin performans karşılaştırması: a) Çıkış gücü, b) enerji verimliliği.

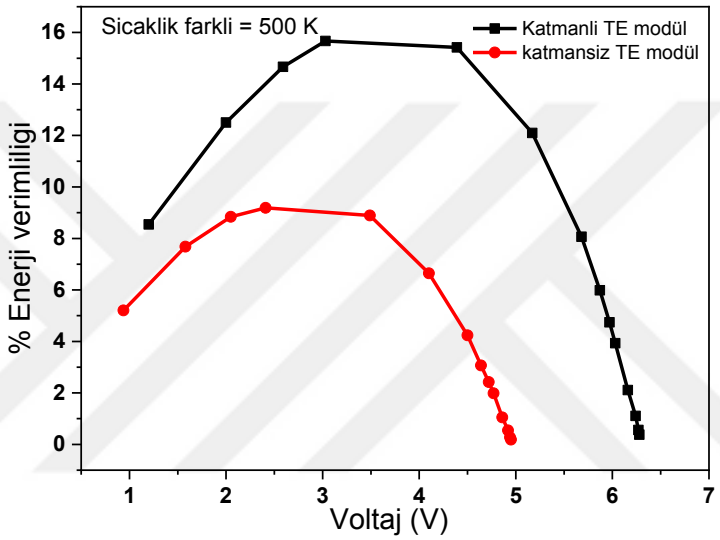
Bu analiz, bir TE modülün performansının büyük ölçüde kullanılan TE malzemelere bağlı olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, yüksek performanslı TE malzemeleri bile, çalışma sıcaklık aralığının dışında çalıştırıldığında düşük performansa neden olabildiği görülmüştür. Modül 1 (tellür bileşikleri) en yüksek performansa sahip olmasına rağmen, tellür çok azdır ve nispeten toksiktir, bu nedenle TE modüllerin büyük ölçekli üretimi için kullanılamaz. Bu nedenle, tellür bazlı bileşiklere olan bağımlılıklar azaltılmalıdır. Şimdiye kadar tellür içermeyen ve oda sıcaklığında yüksek performanslı TE malzemesi bulunmamakla birlikte, bu durum özellikle oda sıcaklığına yakın çalışma için TE modüllerin üretiminde tellür bazlı TE malzemelerinin kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır. Hem tellür bazlı TE malzemelerin kıtlığını ele alacak hem de nispeten yüksek performansın elde edilmesini sağlayacak yeni yollardan biri,

tellür bazlı TE malzemelerin bir kısmını düşük performanslı ancak doğada oldukça bol bulunan elementleri içeren TE malzemeleriyle değiştirmektir. Bu şekilde tellür esaslı TE malzemesine bağımlılık azalırken, tellür esaslı TE malzemelerinin bir kısmı tutularak nispeten yüksek çıktı performansı elde edilebilir. Sonuçlar, tellür bazlı bileşiklerin %50'sinin değiştirilmesiyle, orijinal çıkış gücünün %82'sinden fazlasının korunabileceğini göstermiştir. Bir modülde birçok TE malzemesinin kullanılmasıyla ilgili olası bir araştırma sorunu, TE malzemelerinin muhtemelen farklı CTE değerlerine sahip olabileceğinden kaynaklı oluşan termal gerilmedir. Yeni TE modülde ki termal gerilme, geleneksel modüldekinden daha yüksek olabilir ve bu, yeni modülün ticari modüllerinkinden daha düşük bir sıcaklık gradyanında çalıştırılması gerektiği anlamına gelir. Bu potansiyel dezavantaj ancak benzer sıcaklık aralığı, zT ve CTE değerlerine sahip ikinci TE malzeme grup uygun şekilde seçilerek giderilebilir. Burada hem Cu_2Se hem de Ag_2Se çok benzer operasyonel ve termoelektrik davranışa sahiptir ve bu nedenle yukarıdaki dezavantaj stratejik olarak en aza indirilmiştir.

4.2. KATMANLI TERMOELEKTRİK MODÜLÜN COMSOL MULTIPHYSICS ÜZERİNDE PERFORMANS SONUÇLARI

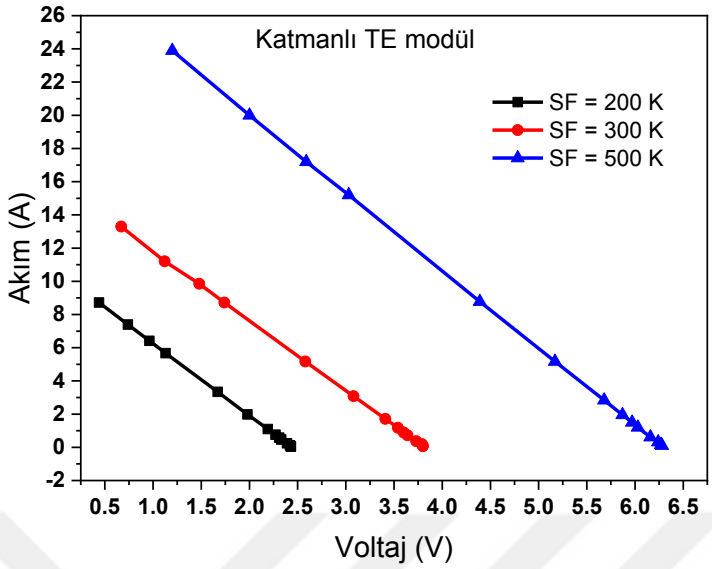
Sırasıyla 300 K ve 450 K soğuk taraf ve arayüz sıcaklıkları ile segmented (katmanlı) bir modül (32 çift) için benzetimi başarıyla gerçekleştirildi. Üç farklı benzetim grup için sıcak taraf sıcaklığı 500 K, 600 K ve 800 K'dir. Optimizasyon için çeşitli benzetimlar yapıldı. Bacakların uzunluğu, optimum verim ve minimum termal gerilme elde etmek için yeterince uzun olmalı ve yüksek çıkış gücü üretecek kadar kısa olmalıdır. Böylece 6 mm seçildi. Soğuk taraftan, Bi_2Te_3 ve Sb_2Te_3'ün en yüksek verime sahip olduğu sıcaklık, bacak uzunluğunun yaklaşık üçte birinde meydana gelecek şekilde seçildi. Bu seçin önceki analiz sonuçlarından gelmektedir. Böylece, segmentasyon oranı tek tiptir ve sırasıyla 2:1 Skutteruditlerin tellür birleşiklere karşı olduğu bulunmuştur. P-tipi ayağın kesit alanı 4 mm × 4 mm olarak seçildi. Hem Skutteruditler hem de tellür bazlı TE bileşikler için n-tipi ve p-tipi bacakların özdirençleri farklıdır. Aynı kesit alanına sahip olmak, akımı en yüksek dirençli bacaktan geçirecek ve bu da bacağın çıkış veriminin düşük olmasına neden olacaktır. Modülün optimal verimliliği için A_n ve A_p ilişkis, şöyle $\frac{A_n}{A_p} = \sqrt{\frac{\sigma_p \kappa_p}{\sigma_n \kappa_n}}$ olmalıdır. Modülün toplam boyutu 40 mm × 40 mm × 7 mm'dir. Daha önce belirtildiği gibi, uyumluluk faktörü, modülün dönüştürme verimliliğini artırmanın anahtarıdır. 500 K'lik bir sıcaklık gradyanında, katmansız Skutterudite *n*-tipi $Ba_{0.1}Yb_{0.2}Fe_{0.1}Co_{3.9}Sb_{12}$ ve *p*-

tipi $Ce_{0.5}Yb_{0.5}Fe_{3.25}Co_{0.75}Sb_{12}$ tabanlı TEJ modülünün hesaplanan dönüşüm verimliliği %10'dur, maksimum simüle edilen verimlilik %9,2'dir. Bununla birlikte, aynı sıcaklıkta, katmanlı edilen TEJ cihazının hesaplanan dönüşüm verimliliği %17,2, simüle edilen maksimum dönüşüm verimliliği ise %15,7'dir. Şekil 4.23'te hem katmanlı hem de katmansız modülün simüle edilen verimliliklerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Katmanlı modül, katmansız TE modülüne kıyasla hesaplanan ve simüle edilen dönüşüm verimliliklerinde %72 ve %70.7 artışa sahiptir, ve bu segmentasyonun başarılı olduğunu göstermektedir.

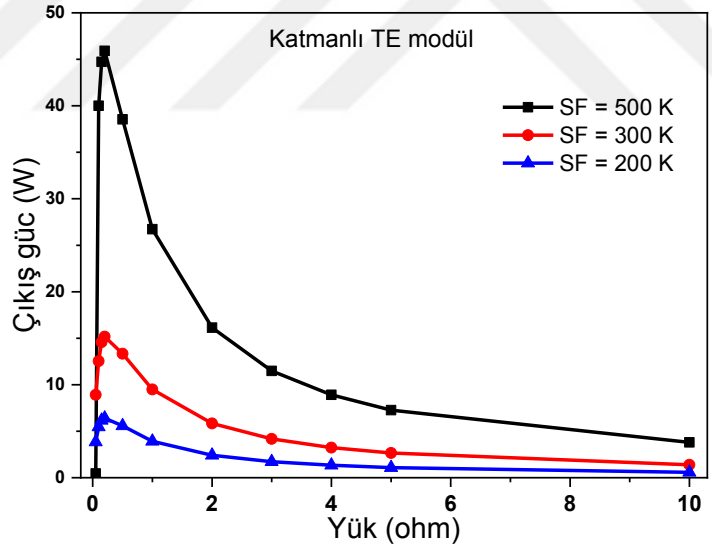


Şekil 4.23: Katmanlı ve katmansız TE modüllerinin enerji verimliliği.

Katmanlı TE modüllerin, katmansız TE modüllere göre daha yüksek dönüşüm verimine sahip olduğu onaylanmış (hesaplanıp simüle edilerek) çıkış gerilim, cihazdan geçen akım ve güç gibi diğer çıkış parametreleri ile belirlenmiştir. Şekil 2.24'te, üç farklı sıcaklık gradyanında çıkış gerilimine karşı çıkış akımının grafiğini göstermektedir. Beklendiği gibi, voltaj arttıkça akım azalmakta, en yüksek akımın olduğu noktada voltaj en düşüktür. Ayrıca, sıcaklık farklı artınca hem voltaj hem de akım artmaktır. Şekil 2.25'te, yük direncine karşı güç grafiğini göstermektedir. Yük direnci iç dirence eşit olduğunda güç maksimuma ulaşır. Bu noktadan sonra, yük direnci artarsa güç azalır. 500 K'lik sıcaklık farkına ulaşıldığında TE mödül en yüksek performansa, 200 K'lik sıcaklık farkında ise en düşük performans değerine ulaşmaktadır.

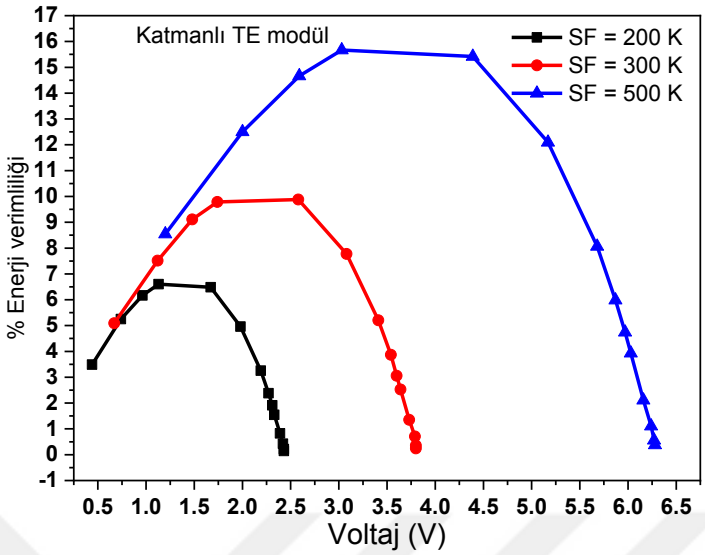


Şekil 4.24 : TE modülün akım ve voltaj değişimi.



Şekil 4.25: TE modülün çıkış gücü ile yük direnci değişimi.

Şekil 4.26'da, katmanlı TE modülün enerji verimliliğini göstermektedir. Burada, voltaj sıfırdan $\frac{V_{max}}{2}$ değerine ulaşana kadar enerji verimliliği artmaktadır ve bu değere geçtiğinde enerji verimliliği azalır. TE modülün optimum verimliliğinin olduğu nokta $R_L = R\sqrt{1+ZT_{av}}$ olduğu durumdur.



Şekil 4.26: TE modülün çıkış gücü ile gerilim değişimi.

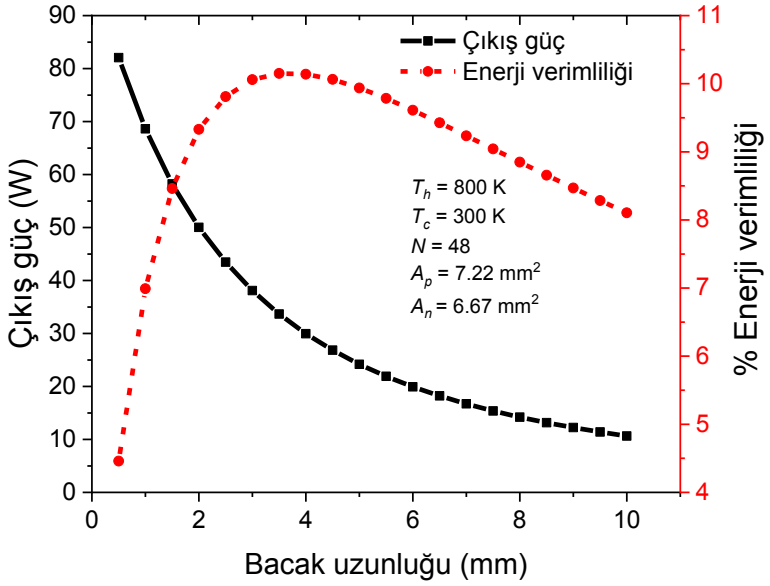
4.3. THOMSON ETKİSİ VE TEMAS DİRENCİNİN TERMOELEKTRİK MODÜLÜN PERFORMANSINA ETKİSİNİN SONUÇLARI

Bu tez kapsamında yapılan bir diğer çalışma ise Thomson etkisi ve temas direnci dikkate alınarak, modülün optimum geometrik parametrelerinin elde edilmesi ve bunun için genetik algoritma yaklaşımı kullanılarak maksimum güç çıkışının optimize edilmesidir. Tablo 4.2, maksimum güç çıkışı ve enerji dönüşüm verimliliğine karşılık gelen optimum geometrik parametrelere göstermektedir. Geometrik parametrelerin modülün çıkış performansı üzerindeki etkisini anlamak için, TE bacakların uzunluk ve taban kesit alanı arasındaki oran değiştirilmiştir (Şekil 4.27). TE bacakların uzunluğunun artması ile enerji dönüşüm verimliliği artar ve bu optimum uzunluğa ulaşana kadar artmaktadır. TE bacakların optimum uzunluğu, genetik algoritmadan elde edilen sonuçla aynıdır. TE bacakların uzunluğundaki daha fazla artış, hem güç çıkışını hem de enerji dönüşüm verimliliğini azaltmaktadır. Şekil 4.27'nin basit yorumu olarak, eğer 80 W'lık bir güç çıkışı üretmek isteniyorsa bunun için TE bacak uzunluğunun yaklaşık 0,5 mm olması gerektiği söylenebilir. Ancak, bunun için termoelektrik modülün yaklaşık 1.818 W'lık ısı girdisini absorbe etmesi gerekir ki buna karşılık gelen enerji dönüşüm verimliliği yaklaşık %4.4 dür. Bu kadar yüksek ısı enerjisinin modül tarafından emilmesi oldukça zordur. Buna karşın TE bacaklar optimum uzunlukta tutulduğunda modülün elde edilen çıkış gücü 30 W olup modül tarafından emilen ısı enerjisi 300 W olduğu görülmektedir. Bu

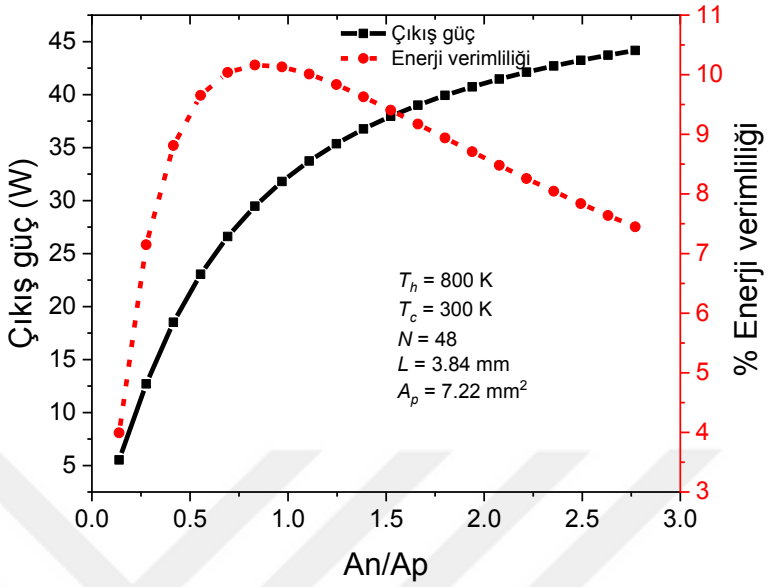
nedenle, modülü optimum geometride çalıştırmak hem pratik, hem de ekonomiktir. Dolayısıyla, bu çalışmanın amaçlarından biridir. Benzer şekilde, Şekil 4.28'de, diğer parametreler optimum değerlerde tutulurken, n-tipi TE bacağın alanı değiştirilmiştir. An/Ap oranı 0'dan yaklaşık 3'e yükseldikçe, güç çıkışı sürekli artarken enerji dönüşüm verimliliği maksimum noktaya ulaşana kadar artmakta ve ardından sürekli azalmaktadır. Genetik algoritmadan elde edilen alanların optimum oranına karşılık gelen bir noktada, enerji dönüşüm verimliliği maksimumdur. İki şekilde de görülmektedir ki, enerji dönüşüm verimliliğinin modülün optimum geometrik parametrelerini belirleyen temel faktör olduğudur. Bunun nedeni güç çıkışının sürekli artması veya azalmasıdır. Modülün optimum geometride çalıştırılması, çıktı performansı ile maliyet arasında bir denge sağlayabilir.

Tablo 4.2: TE modülün optimize edılen sonuçları.

Optimum sonuçlar	**Ünit**	**değer**
Termoelement çift sayısı (N)		48
Bacak uzunluğu (L)	(mm)	3.84
n-type bacak alanı (A_n)	(mm^2)	6.67
p-type bacak alanı (A_p)	(mm^2)	7.22
Max. çıkış gücü (P_{max})	(W)	30.1
Enerji verimliliği (η_{pmax})	(%)	9.87



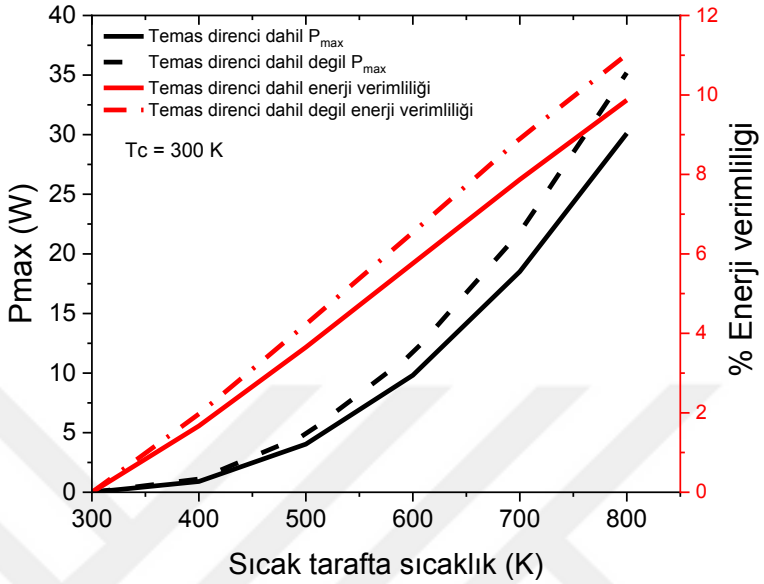
Şekil 4.27: Optimum bacak uzunluğu.



Şekil 4.28: Optimum bacak alanı.

Hem elektriksel hem de termal temas dirençlerinin TEJ' in çıkış performansı üzerinde olumsuz etkileri olduğu iyi bilinmektedir. Temas direncinin etkisi TEJ modülde her zaman mevcuttur, analizde ihmal edilmesi sadece sonuçların fazla tahmin edilmesine yol açmaktadır. Mevcut en son teknoloji, bağlantı başına 10 μΩ cm^2 kadar düşük bir elektriksel temas direncinin elde edilebileceğini göstermektedir, bu nedenle, bu çalışmada yaygın olarak kullanılan 100 μΩ cm^2 başına bu değer benimsenmiştir. Bacak başına toplam termal temas direnci 1.8×10^{-4} m^2 K/W'dir. İki temas direncini ohm cinsinden modelleyerek, TEJ modülünün çıkış performansı üzerindeki toplam etkisi görülebilir. Şekil 4.29'da, hem P_{max} hem de enerji dönüşüm verimliliği grafikleri incelendiğinde temas dirençleri (elektrik ve termal) olmadan elde edilen sonuçların, temas dirençleri varken ki elde edilen sonuçlardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Temas direncinin etkisi, sıcak tarafın düşük bir sıcaklık değerinde bile gözlemlenebilir. Yani temas direnci tüm sıcaklık aralığında bulunabilir. T_h = 800 K'de, temas dirençleri olmadan Pmax ve buna karşılık gelen enerji dönüşüm verimliliği sırasıyla 35,2 W ve %11,02'dir. Temas dirençleri olmadan, Pmax ve enerji dönüşüm verimliliği ise sırasıyla %19,4 ve %11,65'tir buda temas direncinin hesaba katılmadığı durumda gerçek çıkış gücü ve dönüşüm verimliliğinden oldukça sapıldığını göstermektedir. Temas dirençleri, TEJ modüllerinin çıktı performansını azaltan başlıca kayıp kaynaklarıdır ve TE modüllerinin çıktı performansının analizinde ve tahmininde asla dışarıda bırakılmamalıdır. Aksi takdirde elde edilen sonuçlar, gerçek sonuçlardan yüksek

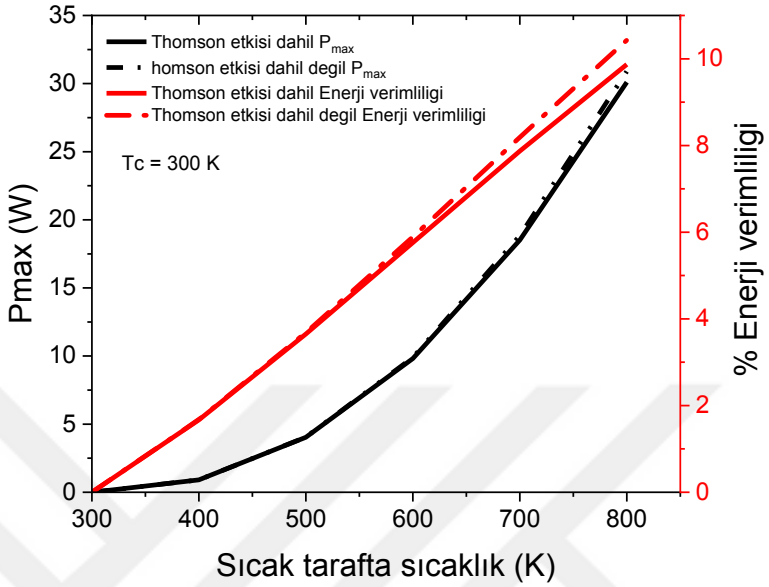
olmakta buda gerçek performans ve çıkış gücü elde edilmesi noktasında bir yanılsamaya neden olmaktadır.



Şekil 4.29: Temas direnci dahil TE modülün çıkış gücü ve enerji verimliliği.

Daha önce belirtildiği gibi, Thomson etkisi, termoelektrik modüllerin analizinde genellikle göz ardı edilir, çünkü Thomson etkisinin modülün çıkış performansı üzerinde diğer üç etkiye, yani Seebeck etkisi, Joule etkisi ve Fourier ısısına kıyasla çok daha az etkilidir. Thomson etkisinin göz ardı edilmesi, TE malzemelerinin özelliklerinin sabit olduğu anlamına gelir. Bir modülün çıktı performansını doğru bir şekilde analiz etmek için, TE malzemelerinin özellikleri sıcaklığa bağlı olarak düşünülmeli ve bu nedenle analize Thomson etkisi dahil edilmelidir. Bu çalışmada, Thomson etkisi olan ve olmayan maksimum güç çıkışı (Pmax) ve enerji dönüşüm verimliliği sonuçları Şekil 4.30'da görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. TEJ' ün iki tarafı arasındaki düşük sıcaklık farkında her iki durumda da (Thomson etkisinin olduğu ve gözardı edildiği) aynıdır. Ancak yüksek sıcaklık farklarında ikisi arasında bir fark oluşmakta dolayısıyla Thomson ısısının etkisi görülmektedir. Th = 800 K'de, Thomson etkisi olmadan Pmax ve buna karşılık gelen enerji dönüşüm verimliliği sırasıyla 30,9 W, %10,43'tür. Buna karşılık, Thomson etkisi olmayan sonuçlar incelendiğinde, güç çıkışının ve enerji dönüşüm verimliliğinin sırasıyla %2,66 ve %5,67'lik daha fazla çıktığı görülmektedir. Genel olarak, büyük sıcaklık farkının gerekli olduğu TEJ uygulamalarında, sıcaklık gradyanındaki artışla Thomson etkisi arttığından

Thomson ısı etkisi kolayca fark edilebilir. Thomson etkisinin analize dahil edilmesi daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.



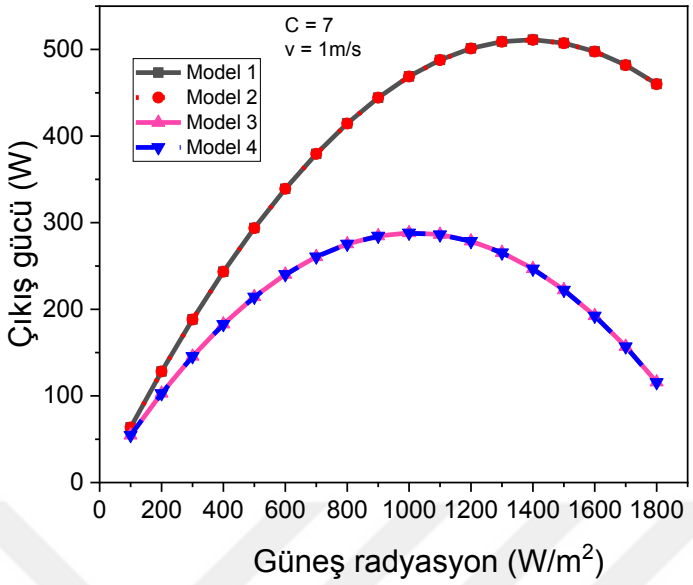
Şekil 4.30: Thomson etkisi dahil TE modülün çıkış gücü ve enerji verimliliği.

4.4. KONSENTRE FOTOVOLTAİK-TERMOELEKTRİK MODÜL HİBRİT ENERJİ ÜRETECİNİN ÇOKLU GENETİK ALGORİTMA YÖNTEMİ İLE PERFORMANS SONUÇLARI

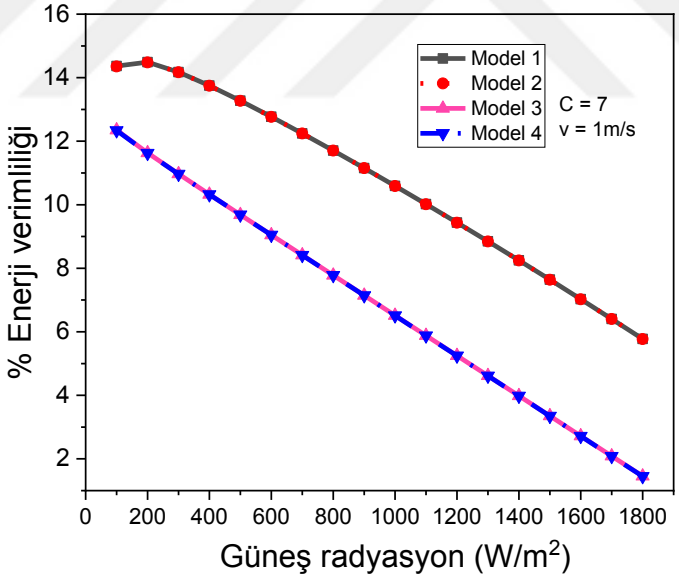
Bu tez kapsmında yapılan bir diğer çalışma ise TEJ lerin FV sistemlerle entegrasyonu ve hibrit bir elektrik üreteçteki rolüni analiz etmektir. Bu bölümde, bir TE modül, bir FV modülünün arka tarafından birleştirilerek FV den gelen fazla ısıl enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla, TE modül tarafında emilmesi analiz edilmiştir. Bir FV modülünün ancak maksimum voltajda çalıştırıldığında maksimum güç üretebileceği bilinmektedir. Maksimum gücün meydana geldiği nokta, güç ve gerilimin türevinin sıfır olduğu yani dP/dV = 0 olduğu noktaya karşılık gelir. Aynı şekilde, TE modül ancak yük direnci iç direncine eşit olduğunda maksimum güç üretebilir. Bu koşul, TE modülün bağımsız çalışması için geçerlidir. Bir FV-TE sisteminde sistemin maksimum güç çıkışının sağlanması , TE modülün, yük direnci iç direncinden biraz daha az olması ile sağlanır. Bununla birlikte, gerek FV gerekse de TE modül, hem maksimum güç noktasında hem de maksimum güç noktasından uzakta çalışabilir. Bu nedenle, bu çalışma da bu durumlar dikkate alınarak bir KFV-TE sistemi için dört KFV-TE sistem önerilmiş ve

matematiksel olarak modellenmiştir. Burada, çok amaçlı genetik algoritma kullanılarak sistemler optimize edilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Model 1'in matematiksel denklemleri hem KFV hem de TE alt sistemlerinin maksimum güç çalışmasını tanımlarken, model 2'deki denklemler KFV'nin maksimum güç çalışmasını ve TE modülünün maksimum güç noktasından uzakta çalışmasını tanımlamakatadır. Yani diğer bir deyişle $R_L \neq R_i$. Model 3 ve 4, KFV'nin maksimum güç noktasından uzakta çalışmasını tanımlayan denklemlerden oluşur, yani dP/dV ≠ 0, aynı zamanda model 3, TE modül maksimum güç noktasında çalıştığı model 4 ise TE modül maksimum güç noktasından uzakta çalıştığı durum olarak modellenmiştir.

Yapılan optimizasyondan, modellerin ortalama optimum konsantrasyon oranı 7'dir, bu nedenle, Şekil 4.31'de ve şekil 4.32'de görüldüğü gibi güneş radyasyonunun değişimine göre modellerin çıkış gücü ve enerji dönüşüm verimlerini belirlemek için parametrik çalışma yapılmıştır. Her modelin çıkış gücünün maksimum noktaya ulaşılana kadar güneş radyasyonundaki artışla arttığı, güneş radyasyonundaki daha fazla artışın çıkış gücünde bir azalmaya neden olduğu, bu da optimum güneş radyasyonunun aşıldığını göstermektedir. Model 1 ve 2 benzer davranışa sahiptir, benzer şekilde model 3 ve 4 benzer davranışa sahiptir çünkü model 1 ve 2'de KFV'nin matematiksel denklemleri aynıdır. Benzer şekilde, model 3 ve 4'teki KFV'nin matematiksel denklemleri aynıdır. Bir KFV-TE sisteminde, KFV çıkış gücünün çoğuna katkıda bulunur, bu nedenle modellerin davranışı KFV'ninkine benzerdir. Tüm modellerin enerji verimliliği, güneş ışınımının artmasıyla azalır, en yüksek güneş ışınımı olan 1800 W/m^2'de, model 1 ve 2, ve model 3 ve 4 için sırasıyla yaklaşık %6 ve %1,8'lik enerji verimliliği elde edilirdir. Model 1 ve 2, model 3 ve 4'e kıyasla yüksek çıkış performansına sahiptir. Çünkü model 1 ve 2 için KFV maksimum güç denklemleri kullanılır. Model 1 ve 2'nin çıktı performansı çok yakındır çünkü aynı maksimum güç noktası denklemi KFV'yi tanımlamaktadır. Ayrıca, aynı denklem KFV alt sistemini tanımladığı için model 3 ve 4 benzer çıktı performansına sahiptir.



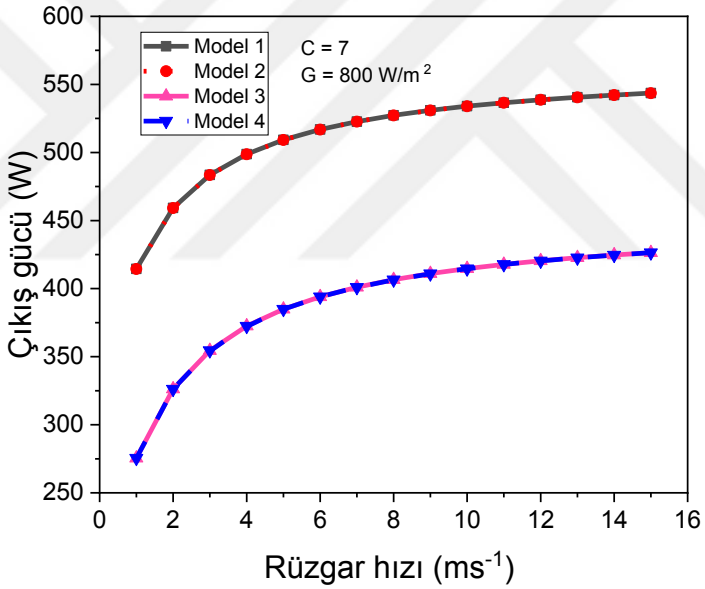
Şekil 4.31: Hibrit sistemlerin çıkış gücü ile güneş radyasyon değişim.



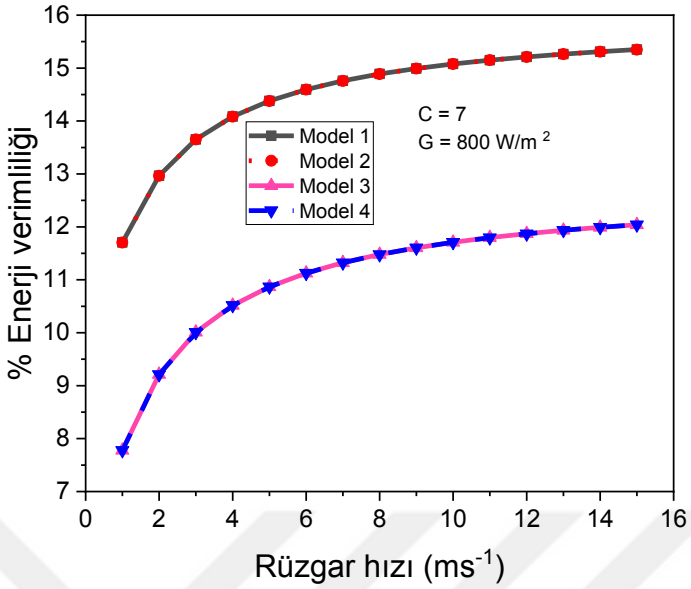
Şekil 4.32: Hibrit sistemlerin enerji verimliliği ile güneş radyasyon değişim.

Şekil 4.33 ve şekil 4.34'te yukarıdaki benzer analizler yapıldı, ancak bu durumda güneş ışınımının sabit olduğu ve rüzgar hızının değiştiği varsayıldı. Doğal konveksiyon soğutması rüzgar hızındaki artışla artar, bu soğutma KFV'nin yüzey sıcaklığını düşürerek çıkış gücünü arttırır. Rüzgar hızı 1 m/s'den 4 m/s'ye yükseldiğinde hem çıkış gücünde hem de enerji verimliliğinde keskin bir artış olduğu görülebilir ve rüzgar hızındaki daha fazla artış modellerin

çıkış performansını biraz arttırdığı görülmektedir Bu durum, KFV-TE sisteminin çalışması için optimum bir rüzgar hızının olduğunu göstermektedir. Her nekadar 15 m/s'ye kadar bir rüzgar hızı teknik olarak mümkün olsa da, genellikle bu büyüklükteki yüksek rüzgar hızının elde edilmesinde aktif zorlanmış bir soğutma sistemi kullanılmasını gerektirir. Zorlanmış bir konveksiyonda, soğutma vantilatörü sistemden enerji tüketir ve böylece sistemin toplam çıkış gücünü azaltır. Bu analiz, maksimum güç noktasında çalıştırılan bir KFV-TE sisteminin, sistemin maksimum güç noktasından uzakta çalıştığı zamana kıyasla daha üstün bir çıkış performansına sahip olacağını göstermektedir. Ayrıca, yüksek güneş radyasyonunun KFV-TE sisteminin performansını olumsuz etkileyebileceğini, rüzgar hızındaki artışın ise sistemin çıkış performansını artırdığını göstermektedir. Ayrıca, bir KFV-TE sisteminde çalışan TE modülünün performansı, KFV'nin performansına kıyasla küçüktür.



Şekil 4.33: Hibrit sistemlerin çıkış gücü ile rüzgar hızı değişim.



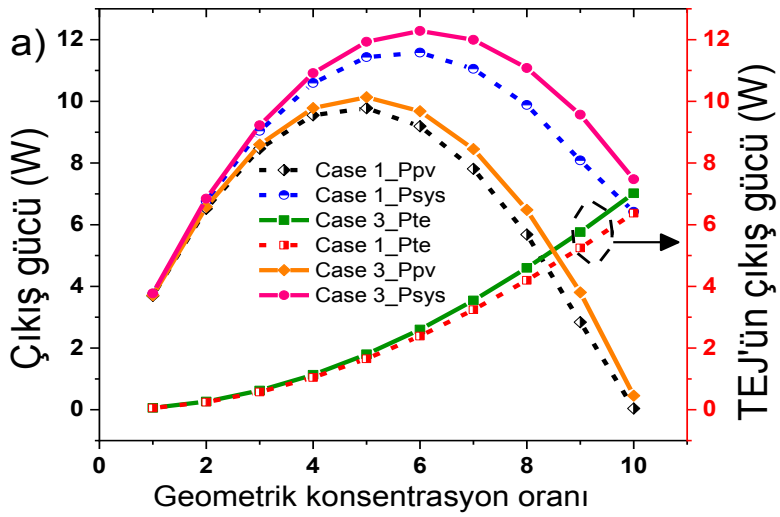
Şekil 4.34: Hibrit sistemlerin enerji verimliliği ile rüzgar hızı değişim.

Analiz sonuçları KFV-TE sisteminde esas güç sağlayacının KFV olduğunu buna karşın TE modüllerin diğer parametreler (Rüzgar, güneş ışınları yoğunluğu vb) dışında performansında önemli rol oynadığını göstermektedir.

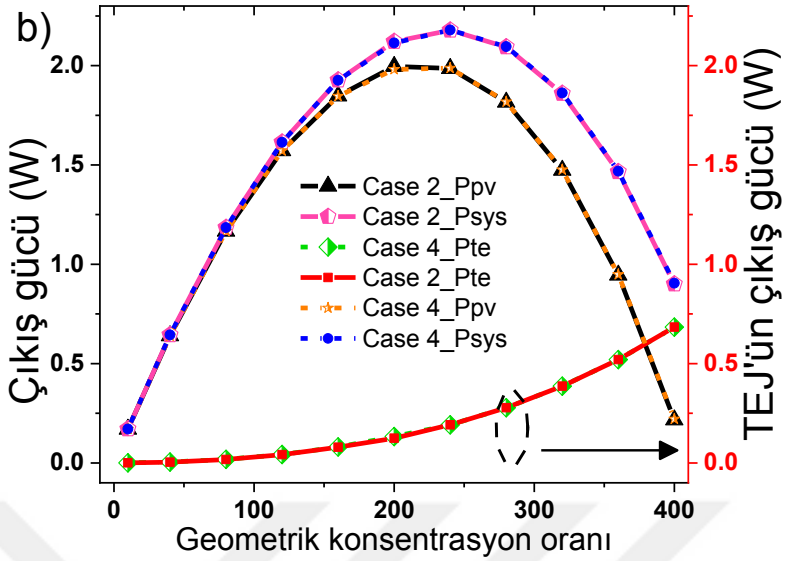
4.5. GÜÇ ÇIKIŞI İÇİN KONSANTRE FOTOVOLTAİK-TERMOELEKRİK HİBRİT SİSTEMLERDE TERMAL DİRENÇ SONUÇLARI

Tez kapsamında yapılan bir başka çalışmada önceki çalışmadan yola çıkarak FV-TE hibrit sisteminde termal direnç etkisi (FV ve TE arasındaki temas) incelenmiştir. Şekil 4.35'da ve şekil 4.36'de, FV ve TEJ'den oluşan sistemin çıkış gücünün geometrik konsantrasyon oranına göre değişimini göstermektedir. Grafikten ilk olarak, FV-TE 'nin çıkış gücü konsantrasyon oranındaki artışla arttığı, bu artışın maksimum noktalara ulaşılana kadar devam ettiği, daha sonra konsantrasyon oranının daha da artışında azaldığı görülmektedir. Bu davranışın nedeni, konsantrasyon oranı 1 olduğu durumdan itibaren arttıkça artmakta, konsantrasyon oranının varlığından dolayı enerji çıkışının artmasıdanda kaynaklanmaktadır. Bu durum maksimum değere ulaşılana kadar geçerlidir. Konsantrasyon oranındaki artışın daha fazla artması, çıkış gücünde bir azalmaya neden olacaktır, çünkü FV'nin verimlilik sıcaklık katsayısının etkisi, konsantrasyon oranındaki artışı baskılamaktadır. Öte yandan, tüm durumlarda TEJ'nin çıkış gücü, konsantrasyon oranındaki artışla artmaktadır. Burada, konsantrasyon oranı arttıkça

FV'nin arka tarafında üretilen termal enerji artar, dolayısıyla TEJ tarafından daha fazla ısıl enerji emilir. Şekil 4.35'da görüldüğü gibi, FV, TEJ ve 3. durumdaki sistemin çıkış gücü, birinci duruma karşılık gelen çıkış gücünden daha yüksektir. Bunun nedeni, durum 1'de, arka taraftaki ısı yalıtımının olmasıdır. Yalıtım FV'nin sıcaklığının artmasına neden olur, bu da FV'nin çıkış gücünü düşürür. 3. durumda bakır levha ısı transferini arttırırken, hem FV hem de TEJ için daha yüksek performans gözlenmektedir. Şekil 4.36'de, 2 ve 4 numaralı durumlarda modellerin ürettiği çıkış gücü arasında önemli bir fark yoktur, bunun nedeni her kasanın ısı transferini kolaylaştıran bir bakır plakaya sahip olmasıdır. Ancak Şekil 4.36'de belirtilen nedenden dolayı 4. durumdaki modelin performansı 2. durumdaki modelden biraz daha yüksektir. Ayrıca ikinci durumda bakır levhanın üst yüzeyinde ısı yalıtımı olduğu varsayılmaktadır. Ancak bu ısı yalıtımı sağlanmazsa, ısı enerjisinin bir kısmı çevreye kaybolacak ve böylece ikinci durumda çalışan TEJ'den düşük performans gözlemlenecektir. Her iki şekilde de, su pompası tarafından tüketilen güç, FV ve TEJ tarafından sağlanan çıkış gücüne kıyasla çok küçüktür ve bu nedenle gösterilmemiştir. Pompa güç tüketimi, akış hızı, kanal sayısı, akış alanı veya akış uzunluğundan herhangi birinin artmasıyla artmaktadır. Ayrıca, bu şekillerde sistemin çıkış gücünün FV'ninkinden daha yüksek olduğu görülebilir, bunun nedeni TEJ tarafından üretilen ek güçtür. Ayrıca, her bir FV ve sistem için bir optimum konsantrasyon oranı vardır. Her durumda, FV'nin çıkış gücünün maksimum olduğu optimum konsantrasyon oranı, sisteminkinden farklıdır. Buna göre birinci ve üçüncü durumlar için sistemin optimum konsantrasyon oranı 6 iken ikinci ve dorduncu durumlar için 240'dır.

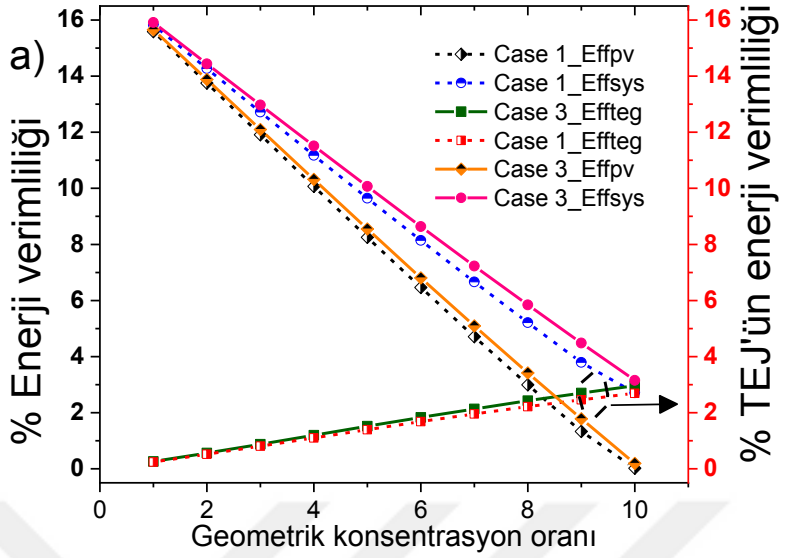


Şekil 4.35: Durum 1 ve 3 hibrit sistemlerin çıkış gücü ile geometrik kosentrasyon oranı değişim.

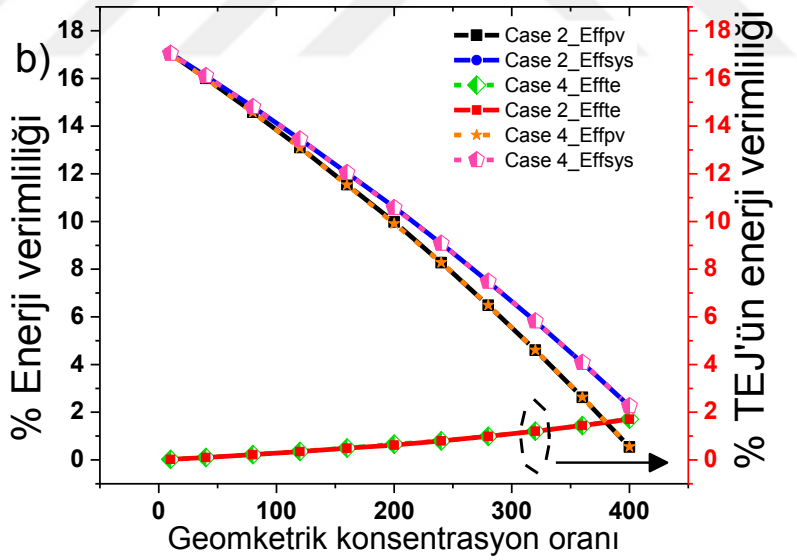


Şekil 4.36: Durum 2 ve 4 hibrit sistemlerin çıkış gücü ile geometrik kosentrasyon oranı değişim.

Çıkış gücü ve enerji girişi bilinerek modellerin enerji dönüşüm verimleri kolaylıkla belirlenebilir. Şekil 4.37'de durum 1 ve 3 için FV, TEJ ve sistemin enerji dönüşüm verimliliklerini sunarken Şekil 4.38'de durum 2 ve 4 için enerji dönüşüm verimliliklerini göstermektedir. Her model için, enerji dönüşüm verimlilikleri FV ve sistem, konsantrasyon oranındaki artışla monoton olarak azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, giriş enerjisinin konsantrasyon oranıyla doğru orantılı olması, çıkış enerjisinin ise FV'nin verimlilik sıcaklık katsayısının dahil olduğu birçok faktöre bağlı olmasıdır. Aksine, konsantrasyon oranındaki artışla TEJ'nin dönüşüm verimliliği artar. Bu, TEJ'nin iki tarafı arasındaki sıcaklık gradyanındaki bir artıştan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.37'ya bakıldığında, durum 3'teki enerji verimlerinin durum 1'den daha yüksek olduğu görülebilir, bu durum 3'te durum 1'e kıyasla daha yüksek çıkış gücü elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.38'de her iki durumda da enerji verimliliği hemen hemen eşittir. Yine bunun nedeni ikinci ve dorduncu durumlarda elde edilen çıkış gücünün değerlerinin hemen hemen aynı olmasıdır. TEJ'in düşük çıkış gücü katkısı nedeniyle enerji verimliliği düşüktür. Maksimum konsantrasyon oranında, üçüncü durumda TEJ'nin enerji verimliliği birinci durumda olduğundan daha yüksek ve yaklaşık olarak ~ %3'tür ve her iki durumda da ikinci ve dorduncu durumda ise bu değer %1,71'dir. Sistemlerin toplam enerji verimliliği, ideal konsantrasyon oranında en yüksek düzeydedir.



Şekil 4.37: Durum 1 ve 3 hibrit sistemlerin enerji verimliliği ile geometrik kosentrasyon oranı değişim.

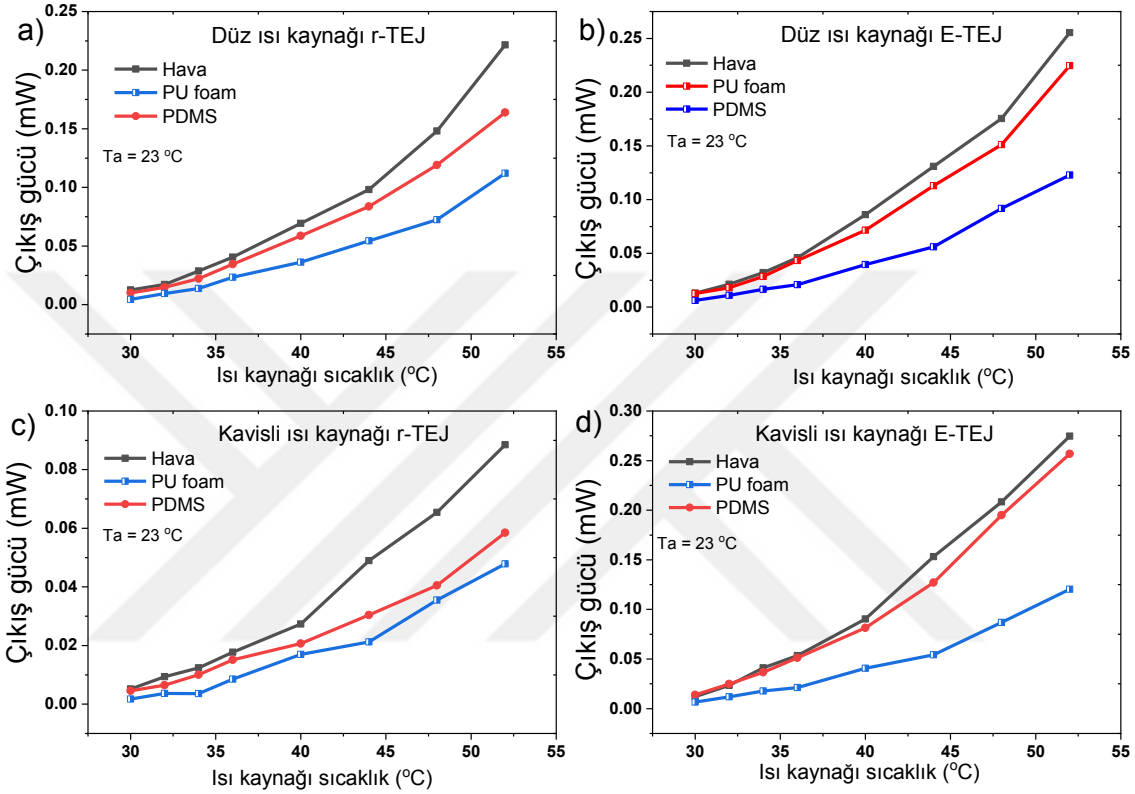


Şekil 4.38: Durum 2 ve 4 hibrit sistemlerin enerji verimliliği ile geometrik kosentrasyon oranı değişim.

4.6. ESNEK VE RİJİT TERMOELEKTRİK MODÜLLERDE DOLDURMA MALZEMESİNİN MODÜL PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE TEORİK SONUÇLARI

Bu tez kapsamında yapılan diğer çalışma ise ısı kaynağının geometrik yapısı ile doldurma malzemelerinin atık ısı-elektrik enerjisi üretiminde kullanılan bir TEJ in performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu analiz, ısı kaynağı ve dolgu malzemelerinin hem rijit hem de esnek TEJ'nin çıktı performansı üzerindeki etkisini belirlemek için yapılmıştır. Bu bölümde esnek ve rijit TE mödüllerin performansı ölçülmüştür. Burada sadece sıcak taraf sıcaklığı bilinir ve kontrol edilebilirdir. Şekil 4.39a)'da ve şekil 4.39b)'da, düz bir ısı kaynağına yerleştirildiğinde r-TEJ'lerin (Rijit TE) ve E-TEJ'lerin (Esnek TE) çıkış gücünü göstermektedir. Her iki şekilde de, TEJ'lerin performansı, ısı kaynağının sıcaklığının artmasıyla artar ve her durumda, bacaklar arasında hava bulunan TEJ, PU köpük ve PDMS kullanıldığı zamana kıyasla daha üstün bir performans gösterdiği görülmektedir. Isı kaynağının maksimum sıcaklığında Ts = 52 ˚C, her iki şekilde de doldurma malzemesi olarak PDMS kullanılan r-TEJ ve E-TEJ'nin performansı, doldurma elemanı olarak hava kullanılan r-TEJ ve E-TEJ'nin performansına kıyasla %50 daha az olduğu görülmüştür. Dolayısıyla en yüksek çıkış gücü doldurma elemanı (TE bacaklar arasında) olarak havanın kullanıldığı modüller olup elde edilen çıkış gücü ve güç yoğunluğu rijit TEJ (r-TEJ) için sırasıyla 0,221 mW ve 27,9 μW/cm^2'dir. Aynı maksimum ısı kaynağı sıcaklığında, E-TEJ için elde edilen en yüksek çıkış gücü ve güç yoğunluğu, yine TE ayakları arasında hava olduğunda elde edilmiş olup ve bu değerler 0,255 mW ve 32,2 μW/cm^2'dir. Şekil 4.39c)'da ve 4.39d)'da, r = 40 mm'lik bir kavisli ısı kaynağına yerleştirilen r-TEJ'lerin ve E-TEJ'lerin çıkış gücünü göstermektedir. Beklendiği gibi, en düşük termal iletkenliğe sahip dolgu malzemesi ile r-TEJ'nin çıkış performansı diğer iki duruma göre daha üstündür. Bu deneyde sıcaklık gradyanı oluşturulmadığını, bunun yerine ortam havasının TEJ'lerin soğuk tarafında soğutmayı sağladığı hatırlanmalıdır. Ts = 52 ˚C'lik kavisli ısı kaynağı sıcaklığında, dolgusuz, PU köpüklü ve PDMS dolgulu r-TEJ'nin çıkış gücü sırasıyla 0,089 mW, 0,059 mW, ve 0,048 mW'dir. Güç yoğunlukları sırasıyla 11,12 μW/cm^2, 7,45 μW/cm^2, ve 6,06 μW/cm^2' olarak elde edilmiştir. Şekil 4.39b)'da gösterildiği gibi benzer analiz E-TEJ'ler için tekrarlanmıştır. Burada, PU köpük dolgu malzemeli E-TEJ'nin performansının, dolgusuz E-TEJ'nin performansına, PDMS dolgu malzemeli E-TEJ'e göre daha yakın olduğu görülmektedir. Yine şekil 4.39c'da ve 4.39d'de de karşılaştırıldığında E-TEJ'lerin emsallerine göre daha fazla çıkış gücü ürettiği görülebilir. Bunun en az iki nedeni vardır: daha önce belirtildiği gibi E-TEJ'lerdeki bağlantı

sayısındaki azalma ve r-TEJ'ler ise kavisli ısı kaynağından gelen enerjinin yalnızca bir kısmını emer. Ama E-TEJ' esnek yapısından dolayı sıcak tarafı ısı kaynağı ile tam temas halindedir. *Ts* = 52 ˚C maksimum kavisli ısı kaynağı sıcaklığında, TE ayakları arasında hava bulunan E-TEJ'nin en yüksek çıkış gücü ve güç yoğunluğu 0,275 mW ve 34,7 μW/cm^2'olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.39: Çıkış gücü: düz ısı kaynağı: a) r-TEJ, b) E-TEJ; kavisli ısı kaynağı: c) r-TEJ, d) E-TEJ.

5. TARTIŞMA

5.1. DÜŞÜK MALİYETLİ MODÜL ÜRETİMİ İLE, MEKANİK, MALİYET, VE PERFORMANS ÖLÇÜMLERİ ÜZERİNE TARTIŞMALAR

5.1.1. Termoelektrik Malzemelerin Karakterizasyonu

Bu çalışmada, TE uygulamalar için uygunluklarını belirlemek için dört TE malzemesi sentezlendi ve karakterize edildi. Sentezlenen malzemelerin her birinin davranışı, çalışmamızı doğrulamak için ilgili literatürle karşılaştırıldı. Örneğin, $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$'ün TXIK sonuçları, Mi ve diğerlerinin çalışmasıyla eşleştiği görüldü (2019). İki malzemenin TXIK analizleri literatürle örtüşmekle beraber referans olarak gösterilen Mi ve arkadaşalarının çalışmasındaki spektruma kıyasla tepelerin hafif kaydığı görülmüştür. Tepelerdeki kayma kristal boyutunun değişmesinin bir sonucu olup genel olarak malzeme hazırlama tekniği ile ilgilidir. TXIK sonuçlarının karşılaştırıldığı referans çalışmasında (Mi ve diğerleri) malzemeler bilyeli öğütüldükten sonra 673 K'de sinterleme işleminde kıvılcım plazma sinterleme (SPS) yöntemiyle sinterlenmiştir. Bu çalışmamızda ise örnekler SPS yerine kontrollü olarak yüksek sıcaklık fırınında sinterlenmiştir. Diğer bir deyişle SPS in aksine sinterleme süresince basınç uygulanmamıştır. Ayrıca, malzemenin taşınım özellikleri incelendiğinde örneklerin sıcaklıkla değişim davranışı literatür ile tam uyumlu olduğu görülmüştür. P tipi BiSbTe örneklerimizde elde edilen zT değerleri literatüre kıyasla nispeten daha yüksek olduğu oda görülmüştür. Benzer şekilde n tipi BiSbTe bileşiklerinin zT değeri de Chen ve diğerlerinin (2020) çalışması ile uyumlu olduğu ve onların sentezlemiş olduğu $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ TE malzemesine kıyasla biraz daha yüksek zT değerine ulaşıldığı görülmüştür. benzer doğrulama yapılmış sonuçlarımızın literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuç olarak sentezlenen her iki n ve p tipi BiSbTe bileşiklerinin zT değerleri, oda sıcaklığında yüksek olduğu ve oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda ise azaldığı görülmüştür, bu da bu malzemelerin oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda yüksek performansı gösterdiğini ve bu sıcaklık uygulamaları için ideal olduğunu göstermiştir.

Benzer şekilde Cu_2Se örneğine ait sonuçlarda, literatürde raporlanan bazı sonuçlar (Choo ve diğerleri, 2021; Demirci ve diğerleri, 2021; Liu ve diğerleri, 2020; Tyagi ve diğerleri, 2015; Yang ve diğerleri, 2015a; Zhang et al., 2020) tamamen uyumlu olduğu görülmüştür. TXIK ve SEM analizi, faz geçişinden sonra malzemenin kristal yapısının monoklinikten kübik yapıya

dönüştüğünü ortaya koymaktadır. Faz geçişi öncesi ve sonrası sıcaklık artışı ile *zT* değerleri artmakta ancak geçiş sırasında düşük bir değere düşmektedir. Benzer şekilde, Ag_2Se'nin davranışı da daha önce bildirilen çalışmalarla doğrulanmıştır (J. Chen ve diğerleri, 2020; Li ve diğerleri, 2020). Ag_2Se de Cu_2Se'nin faz geçişine uğraması gibi, faz geçiş bölgesine kadar malzemelerin *zT* değerleri sıcaklık artışıyla azalır, ardından *zT* değerleri sıcaklıkla artmaktadır.

5.1.2. Termoelektrik Modüllerin Teorik Analizi

Bu çalışmanın bulgularından bir diğeri, TE bacaklarının hem yüzey alanının hem de uzunluğunun bir TE modülün termoelektrik ve mekanik performansı üzerine etkisini ortaya koymaktır. Bir TE modülün çıkış gücü, TE bacakların yüzey alanındaki artışla artmaktadır, bunun nedeni hem TE modülün iç direncindeki azalma hem de enerji absorpsiyonundaki artıştan kaynaklanmaktadır. Buna karşın, bacakların yüzey alanı arttıkça enerji verimliliği maksimum değere çıkmakta, daha sonra yüzey alanı arttıkça enerji verimliliği azalmaktadır (Yusuf vd., 2021a). Bunun nedeni, yüzey alanındaki daha fazla artışla, çıkış gücünün enerji girişine kıyasla enerji verimliliğini artırmak için yeterli olmamasıdır. Öte yandan, bacak uzunluğunun artmasıyla çıkış gücü azalır, bunun nedeni ise modülün iç direncinin artmasıdır. Teorik çıkış gücünün en yüksek değerde olduğu olası minimum bacak uzunluğunda, enerji verimliliği neredeyse sıfırdır. Ayrıca, çok kısa bacak uzunluklarında büyük sıcaklık gradyanları oluşturulamaz. Bu nedenle, TE modüllerini çok kısa ayaklarla çalıştırmak ve ayrıca yüksek çıkış gücü ve enerji verimliliği elde etmek pratik değildir (Yusuf vd., 2021a). Daha ileri analizler ile sıcaklık gradyanındaki artışla termoelektrik performansın arttığını doğrulanmıştır (Yusuf ve Ballikaya, 2020). Ancak sıcaklık gradyanları sürekli olarak artırılamaz çünkü her malzemenin yüksek performansın elde edilebileceği belirli bir sıcaklık aralığı vardır. Büyük bir sıcaklık gradyanında modülü çalıştırmak için, TE modüllerin yapısında genellikle katmanlı yani birden fazla TE malzemeden oluşan bacakların kullanılması gerekmektedir. Bu tez kapsamında elde edilen bir diğer sonuç, yüzey alanının veya bacak uzunluğunun artmasıyla von Mises gerginliğinin arttığının gözlenmesidir. Bunun nedeni, yüzey alanı arttıkça daha fazla termal enerjinin emilmesi ve bacak uzunluğu arttıkça daha büyük sıcaklık gradyanlarının oluşturulabilmesidir. Termal gerilme, sıcaklıktaki artışla orantılı olarak artar, bu, TE modülün çalışacağı maksimum sıcaklık limitini belirler. Analiz, tellür bileşiği içeren bir TE modülün 200 K sıcaklık gradyanının ötesinde çalıştırılmaması gerektiğini, aksi takdirde modülün ömrünün azalacağını göstermektedir (Yusuf ve Ballıkaya, 2022).

5.1.3. Termoelektrik Modüllerin Deneysel Analizi

Bu tezin bir diğer amacı ise düşük maliyet fakat yüksek performaslı modül üretiminin nasıl yapılabileceğini ortya koymaktır. Bunun için ticari TE modüllerin yerine kullanılabilecek yeni bir TE modül tasarlandı, üretildi ve analizleri yapıldı. Ticari TE modüllerin çoğu, oda sıcaklığında olağanüstü yüksek performanslarından dolayı tellür bazlı bileşikler kullandı. Ancak tellür elementi hem doğada az bulunmakta hem de oldukça toksiktir, bu durum TE modüllerinin büyük ölçekli üretimini teşvik etmez. Tellür içermeyen ve aynı zamanda yüksek performansa sahip yeni TE malzeme setlerini keşfetmeye yönelik çeşitli araştırma çalışmaları devam etmektedir. Yeni malzemeler keşfedilene kadar, tellür bazlı bileşiklerin oranı, yaygın olarak bol miktarda bulunan bazı tellür içermeyen ve daha az toksik TE malzemeler ile değiştirilmesi ile azaltılabilir. Ya da tellür bazlı bileşiklerin bir TE modülde kullanımı sınırlandırılabilir. Bu durumda, yeni TE modül, ticari TE modüllerine kıyasla nispeten daha az termoelektrik performansa sahip olurken, tellür içermeyen TE modüllere kıyasla ise daha yüksek olacaktır. Bunun nedeni, tellür bazlı bileşiklerin varlığının bir dereceye kadar TE modülünün, termoelektrik performansını artırmasıdır. Burada, üç farklı TE modülün performansı 100 K' lik bir sıcaklık gradyanında ölçülmüştür. Bu sıcaklık değeri, TE modüllerin termal geriliminde bir artışa neden olacak, yüksek sıcaklıklarda çalışmasını önlemek içinde seçilmiştir. Modül 1 tellür bazlı bileşiklerden oluşmaktadır, modül 2 tellür bazlı ve selenyum bazlı bileşiklerin bir karışımından oluşurken, modül 3 selenyum bazlı bileşiklerden oluşmuştur. Beklendiği gibi, modül 1 en yüksek performansa sahiptir ve en düşük performans modül 3'te elde edilmektedir. Bununla birlikte, modül 2, modül 3'e kıyasla daha yüksek termoelektrik performansa sahiptir ve modül 1'e kıyasla daha az toksik ve doğada bol bulunan elementleri içermesi açısından avantajlıdır. Bu sonuçlar TE modüllerin performansında önemli bir kayıp yaşatmadan genel maliyetini düşürmesi, böylece TE modüllerinin büyük ölçekli üretiminin sağlanabileceğini göstermesi açısından son derece önemlidir. (Yusuf ve Ballikaya, 2022).

5.2. KATMANLI MODÜL TASARIM VE PERFORMANS ANALİZİ ÜZERİNE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada, sentezlenen skutterudite n-tipi $Ba_{0.1}Yb_{0.2}Fe_{0.1}Co_{3.9}Sb_{12}$ ve *p*-tipi $Ce_{0.5}Yb_{0.5}Fe_{3.25}Co_{0.75}Sb_{12}$ ile *n*-tipi Bi_2Te_3 ve p tipi Sb_2Te_3 bileşiklerinden oluşan katmanlı TEJ modülünün dönüşüm verimliliği araştırıldı. 500 K'lik bir sıcaklık gradyanında, katmansız skutterudite tabanlı TEJ modülün maksimum enerji dönüşüm verimliliğinin benzetim ve hesaplanan değerleri sırasıyla %9,2 ve %10'a iken, katmanlı skutterudite tabanlı TEJ modülün

maksimum enerji dönüşüm verimliliği benzetimde %15,7 ölçülen de ise %17,2'lik olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, katmanlı modül yapısının kullanılması durumunda dönüşüm verimliliğinde önemli bir artışın sağlanabildiğini göstermektedir. Elde edilen açık devre gerilim 6,2 V ve buna karşılık gelen yük çıkış gücü 45 W' dır. Bu sonuçlar literatür ile yani Ouyang ve Li sonuçları ile uyumludur (2016b).

5.3. THOMSON ETKİSİ VE TEMAS DİRENCİNİN TERMOELEKTRİK MODÜLÜN PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİ İLE İLGİLİ TARTIŞMALAR

Bir termoelektrik modülün çok parametreli geometrik optimizasyonu, genetik algoritma kullanılarak gerçekleştirildi. Analizde sıklıkla ihmal edilen iki faktör bu çalışmada yer almış ve modül performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- Termoelektrik modülün çıkış performansına temas direncinin etkisi belirlendi. ΔT = 500 K'de, temas dirençleri dikkate alınmadığı yani ihmal edildiğ durumda maksimum güç çıkışı Pmax için %19,4 enerji dönüşüm verimliliğinde ise %11,65 falza bir artış olduğu gözlendi.
- Thomson etkisinin termoelektrik modülün çıkış performansı üzerindeki etkisi araştırıldı. Burada ise ΔT = 500 K'da, Thomson etkisi dikkate alınmadığı durumda, maksimum çıkış gücü Pmax için %2,66 ve enerji dönüşüm verimliliği için %5,67 fazladan artış olduğu gözlendi.
- Bu çalışma, bir termoelektrik modülün çıktı performansının olduğundan fazla tahmin edilmesini önlemek için, modülün iki tarafı arasındaki sıcaklık farkından bağımsız olarak her zaman analize, temas direncinin dahil edilmesi gerektiğini önermektedir. Ayrıca sıcaklık farkı küçük olursa Thomson etkisi ihmal edilebilir ancak yüksek sıcaklık farklarında Thomson etkisinin de modül performansı analizlerinde dahil edilmesi gerektiğini göstermiştir.

5.4. KONSENTRE FOTOVOLTAİK-TERMOELEKTRİK MODÜL HİBRİT ENERJİ ÜRETECİNİN ÇOKLU GENETİK ALGORİTMA YÖNTEMİ İLE PERFORMANSININ ANALİZİ ÜZERİNE TARTIŞMALAR

Sistemin maksimum güç noktasında ve bu noktadan uzakta çalışmasını tanımlayan konsantre fotovoltaik-termoelektrik hibrit sistem için dört model önerildi. Her modelde, baskın olmayan

sıralama genetik algoritması (NSGA II) kullanılarak yedi parametre optimize edilmiştir. Model 1 ve 2, KFV'nin maksimum güç noktasında çalışmasını tanımlarken, model 3 ve 4, KFV'nin maksimum güç noktasından uzaktaki bazı noktalarda çalışmasını tanımlamıştır. TOPSIS çözümünden elde edilen model 1 ve 2 için güç çıkışı ve enerji dönüştürme verimleri sırasıyla 426,5 W, %11,45 ve 461,12 W, %10,77'dir. Model 3 ve 4 için güç çıkışı ve enerji dönüştürme verimleri sırasıyla 276,87 W, %7,62 ve 233,66 W, %9,26'dır. 1'den 4'e kadar olan modellerde hibrit sistemdeki bir TE modülün güç çıkışı katkısı 0,69 W, 1,45 W, 0,61 W ve 1,97 W iken, enerji dönüşüm verimleri ise sırasıyla %0,0185, %0,039, %0,01689 ve %0,078'dir.

Bu çalışmada, KFV-TE den oluşan hibrit sistemin maksimum güç noktasını sağlayacak parametreler optimize edildi ve önerilen modeller içerisinde model 1 veya 2'deki denklem setlerinin optimize etme işleminde kullanılabileceği gösterildi. Ayrıca hibrit sistemde çalışan bir TE modülün optimum performansının bağımsız çalışmasının aksine, yük direnci iç direncinden daha az olduğunda elde edildiği görüldü. Ayrıca, birçok parametrenin aynı anda optimize edilmesi gerektiğinden, hibrit sistemin optimizasyonunda tek parametreli optimizasyon kullanılmaması gerektiği sonucuna ulaşıldı. Son olarak , NSGA II optimizasyonu kullanılarak elde edilen sonuçların, sayısal optimizasyon yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlara göre daha iyi değerler verdiği görülmüştür. Bu sonuçların literatürle yani Yin ve Li (2021) rapor ettiği sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür.

5.5. GÜÇ ÇIKIŞI İÇİN KONSANTRE FOTOVOLTAİK-TERMOELEKRİK HİBRİT SİSTEMLERDE TERMAL DİRENÇ ÜZERİNE TARTIŞMALAR

Konsantre fotovoltaik – term

oelektrik hibrit sistem, yüksek elektrik enerjisi üretmek için tam güneş spektrumunu kullanma yeteneği nedeniyle giderek daha fazla dikkat çeken bir yapıya dönüşmektedir. Bu sistemin çıktı performansı, biri konfigürasyon tipi olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Bu çalışmada, hibrit sistemdeki alt sistemlerin doğrudan termal kuplajının dört farklı konfigürasyonu analiz edilmiş ve elde edilen bulgular özetle aşağıdaki gibidir:

- TE modül tarafından enerji hasadı için termal ısıyı tutmak amacıyla FV'nin arkasında ısı yalıtımı sağlamanın avantajlı olmadığı aksine sistemin verimini düşürdüğü bunun da nedeninin ısının FV'nin sıcaklığını yükseltmesinden kaynaklandığı sonucu çıkarılmıştır.
- FV'nin yüzey alanı TE modülünden farklı olduğunda, iki alt sistem arasına yerleştirilen bakır plaka ısı transferini kolaylaştırdığı görüldü.

- İki alt sistem arasına sıkıştırılmış yeni bir trapez (yamuk) bakır levha, aynı kalınlıktaki dikdörtgen prizma bakır levhaya göre iki nedenden dolayı avantajlı ve performansı artırdığı görülmüştür. Bu nedenlerden biri bu yöntemle daha az bakır malzemeye ihtiyaç duyulması, ikinci neden ise üst veya alt yüzey için ekstra ısı yalıtımı gerektirmemesidir.
- Daha kısa ayaklı bir TE modülün, düşük termal dirence, düşük TE malzeme maliyetine sahip olmasından dolayı, böyle modüllerin KFV - TE sisteminde kullanımının daha ideal olduğu sonucuna varılmıştır.
- Termal macunun termal direnci, hem FV'nin hem de TE modülün yüzey alanları büyük olduğunda hibrit sistemin çıkış performansı üzerinde çok az etkiye sahip olduğu görülmüştür. Buna karşın, yüzey alanlarındaki azalma ile sistemin çıkış performansı üzerindeki zararlı etki artmaktadır. Bu nedenle, sisteme ek termal direnç kazandırmaktan kaçınmak için termal macun ince kalınlıkta kullanılmalıdır.
- Thomson etkisinin, FV alanının büyüklüğünden bağımsız olarak FV'nin ve hibrit sistemin çıkış performansı üzerinde önemsiz bir etkisi vardır. Benzer sonuçlar Yin ve ark. (2017) tarafında da ortaya konulmuştur

5.6. ESNEK VE RİJİT TERMOELEKTRİK MODÜLLERDE DOLDURMA MALZEMESİNİN MODÜL PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE TEORİK SONUÇLARI ÜZERİNE TARTIŞMALAR

Termoelektrik jeneratörler, atık ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme yeteneklerinden dolayı gittikçe kullanım alanlarıda artmaktadır. TEJ ler kullanılan malzemeye bağlı olarak rijit veya esnek olabilmektedir. Örneğin uzay endüstrisi uygulamaları için rijit TEJ, giyilebilir elektronik endüstrisi uygulamaları için ise esnek modüller daha uygundur. TE modüllerde bacaklara mekanik destek sağlamak için genellikle bacaklar arasına katı dolgu malzemeleri doldurulur. İdeal olan, dolgu malzemelerinin düşük termal iletkenliğe sahip olmasıdır, bunun nedeni dolgu malzemesi tarafından ısı enerjisi absorpsiyonunu önlenmesidir. Bu çalışmada, dolgu malzemelerinin ve ısı kaynağının şeklinin TE jeneratörlerinin çıkış performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Teorik modellerin deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmada, düz bir ısı kaynağı için esnek TE modüllerin, rijit TE modüllerinden daha üstün olduğu ve bunun nedeninin şunlardan kaynaklandığı ortaya koyulmuştur. : Farklı termal iletkenliklere ve kalınlığa sahip farklı alt tabakaların kullanılması ve esnek ısıl bağlantıların sayısının az olması esnek modülün performansını düşürmektedir.

Ancak kavisli bir ısı kaynağı için, esnek TE modülleri, rijit TE modüllerinden daha performanslıdır. Bunun nedeni ise yukarıdaki nedenlere ek olarak, bükülebilmelerinden dolayı ısı kaynağına maksimum oranda temas etme yeteneklerinden kaynaklanmaktadır. Oysa rijit TE modüller kavisli ısı kaynaklarında ısı kaynağının ancak küçük bir kısmında ancaktemas halindedir. Ayrıca incelenen üç dolgu malzemesi arasında TE ayakları arasında hava bulunan TEJ'lerin diğer iki dolgu malzemesine sahip TEJ'lere göre daha yüksek performans gösterdiği tespit edildi. 10,3 ˚C sıcaklık gradyanındaki düz ısı kaynağı için, TE ayakları arasında hava olduğunda r-TEJ (rijit TEJ) için hesaplanan en yüksek güç yoğunluğu 137,7 μW/cm^2'dir. En yüksek güç yoğunluğu değeri, 52 ˚C ısı kaynağı sıcaklığında ve 23 ˚C ortam sıcaklığında kavisli ısı kaynağı kullanıldığında ise 11.12 μW/cm^2'ye düşmektir. Benzer şekilde, düz ısı kaynağı kullanıldığında, E-TEJ (Esnek TEJ) için hesaplanan en yüksek güç yoğunluğu, TE ayakları arasında hava olduğunda elde edilen 10,8 ˚C sıcaklık gradyanında 155 μW/cm^2'dir. Yine kavisli ısı kaynağı kullanıldığında bu güç yoğunluğu 34,7 μW/cm^2'ye düşmektedir. Elde edilen bu sonuçlar , neredeyse sabit iç dirence sahip olmaları ve yüksek performansları ve dayanıklılıkları nedeniyle E-TEJ'lerin, sağlık izleme, hareket algılama, kablosuz iletişim için kullanılan güç elektroniği cihazlarına giyilebilir uygulamalar için uygun olabileceğini göstermiştir (Suarez et al., 2017).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

TE malzeme esasına dayanan TEJ lerin önümüzdeki 50 yılda yaşanması ön görülen enerji krizinin çözülmesinde kilit rol oynayacağı, son yıllarda bu alana artan araştırmacı ilgisi ve gelişmiş ülkelerin bu teknolojiye yaptığı yatırımlar ile ortaya konulmuştur. TEJ lerin atık ısıyı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme kabiliyetleri ve dünyada kullanılan tüm enerjinin yaklaşık %70 ni atık ısı enerjisi oluşturduğu göz önüne alındığında TE teknolojinin önümüzdeki 50 yılda enerji endüstrisinde neden yön verebilecek bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Hızla gelişen bu teknolojinin diğer yenilikçi teknolojilerde olduğu gibi aşılması gereken bazı problemleri bulunmaktadır. Bu problemlerin başında TEJ yapısında kullanılan TE malzemelerin verimlerinin henüz istenen seviyede olmamasıdır. TE alanında ki araştırmaların çoğunluğu bu alan üzerine odaklanmış olsada, bu teknolojinin gelişmesini engelleyen başka parametrelerde bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında bu parametreler ağırlıklı olarak analiz edilmiş çözüm önerileri sunulmuştur. Böylece atık ısı-elektrik enerji dönüşümünde termoelektrik modüllerin yaygın kullanılmasının, üretimlerinin artmasını ve büyük ölçekli üretimlerini teşvik edecek sonuçlar içermektedir. Tez kapsamında yapılan bu çalışmaların bir kısmı özetle şu şekildedir;

Öncelike katmanlı TE bacak tasarımı yapılarak modül performansı test edilmiştir. Çalışmada iki farklı TE bileşik grubundan (BiSbTe chalgonedies ve $CoSb_3$ bazlı skutterudite) oluşan katmanlı TE bacak yapısı oluşturularak daha geniş bir sıcaklık aralığında enerji üretiminin mümkün olduğu ve enerji çıkış gücünün de bu oranda arttığı bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Böylece geniş bir sıcaklık farkında (500 ˚C) gibi atık ısı kaynaklarından daha fazla enerji üretimi sağlayabilecek modül tasarımı ve performans analizi yapılmıştır.

Bir başka çalışmada Thomson etkisi ve temas dirençlerinin modül performansı ve çıkış gücü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Thomson etkisinin yüksek sıcaklık farklarında ihmal edilemeyecek derecede modül performansına etkisi olduğu görülmüştür. Benzer olarak bağlantı elemanlarının temas direncinin ise modül performansı üzerinde çok düşük sıcaklıklarda dahi etkisinin olduğu bu çalışma ile ortaya konulmuştur.

Tez kapsamında yapılan bir başka çalışmada güneş enerjisinden maksimum oranda enerji üretimi sağlayacak bir hibrit enerji üreteci tasarımı yapılmış TE modüllerin böyle bir sistemdeki

etkisi analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında bir TE modül ve fotovoltaik hücreden (TE+FV) den oluşan hibrit üreteç genetik algoritma yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar TE+FV hücreden oluşan bir sistemin enerji üretim kapasitesinin bu sistemlerin tek başına kullanılmasından çok daha verimli olduğu görülmüştür.

Bir başka çalışmada ise yoğunlaştırılmış fotovoltaik (KFV) ve TE modülden oluşan bir hibrit enerji üretecinde TE modül ve KFV hücre arasında kullanılacak temas elemanının performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analiz sonuçlarında KFV ve TE modülden oluşan hibrit sisteminde KFV ve TE modül arasında ısı transferinin çıkış gücünde ve sistemin veriminde kritik rol oynadığı, ideal temas elemanının bakır metalinden ve yamuk geometride (minimum termal kayıp için) olması gerektiği ortaya konulmuştur.

Tez kapsamında yapılan bir başka çalışmada ise TE modüllerin içerisinde hem izolasyon hem de modül mekanik özelliklerini güçlendirmek için kullanılan doldurma malzemelerinin TE modül performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Hava, PDMS ve poliüretan köpük gibi malzemeler doldurma malzemesi olarak kullanılmış bunların TE modülün verimliliği ve çıkış gücü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, havanın mevcut malzemeler içerisinde en düşük termal iletkenliğe sahip olmasından dolayı en ideal doldurma elamanı olarak kullanılacabileceği gösterilmiştir.

Son olarak tez kapsamında yapılan diğer çalışmada ise modül yapısında kullanılan bileşiklerin maliyet ve performansları arasındaki ilişki ortaya konulmuş ideal bir modül tasarımı yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada yüksek maliyetli ve yüksek performanslı malzemeler ile düşük maliyetli ve nispeten düşük maliyetli bileşik kombinasyonları bir araya getirilerek maliyet ve verim arasındaki avantaj ilişkisi ortaya konulmuştur. Çalışmanın sonuçları, böyle bir kombinasyonun kullanılması ile modül performansında önemli bir kayıp yaşamadan maliyeti düşürmenin mümkün olduğunu göstermiştir.

Özetle, atık ısı elektrik enerji dönüşümünde kullanılacak TEJ lerin performans, bu performansı etkileyen dış fiziksel (bacak geometrisi sayısı, özellikleri) ve iç fiziksel olaylar (Thomson etkisi, temas direnci etkisi vb) olaylar, modül maliye-performans analizi ile TEJ lerin farklı enerji üreteçleri (FV) ile birlikte kullanım potansiyeli detaylı olarak incelenmiş sonuçlar ortaya konulmuştur. Bu sonuçlar, yeni modül tiplerinin geliştirilmesi, verimli TE modül üretiminin yaygınlaştırılması, TEJ sistemlerinin hibrit sistemlere entregre edilebilmesi gibi bu teknolojinin yaygınlaşmasında gelecekte önemli etkisi olacağı öngörülmektedir.

Aşağıdakiler, gelecekte yapılması önerilen çalışmalardan bazılarıdır:

• $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$ ve *n*-tipi $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$'ün performansını iyileştirmek için yeni stokiyometrik oranlar araştırılmalıdır.

• Cu_2Se ve *n*-tipi Ag_2Se'nin stabilite sorunları vardır, yani faz geçiş zamanında kararsızdırlar, ayrıca oda sıcaklığında çok düşük performans gösterirler ve gümüş elementi de tellür ile karşılaştırıldığında pahalıdır. Bu nedenle, diğer düşük maliyetli, yaygın olarak bulunan ve daha az toksik termoelektrik malzemeler araştırılmalıdır.

• Yeni modülün birçok termoelektrik malzemenin kullanılması nedeniyle yüksek termal genleşme katsayısına sahip olması muhtemel olduğundan, benzer termal genleşme katsayısına sahip bileşikler araştırılmalıdır.

• Seramik ve bakır plakaların kalınlıkları da optimize edilebilmelidir.

• Optimum malzeme oranını belirlemek için tellür ve tellür olmayan bileşiklerin oranı araştırılmalıdır.

• Performansları kanıtlanmış ve sonlu eleman yönteminden çok daha hızlı sonuç verdikleri için için, gelecekteki çalışmalarda metasezgisel optimizasyonların kullanılması tavsiye edilmektedir.

• Termoelektrik malzemelerin sentezine rehberlik etmek ve üretim öncesinde modüllerin performansını doğru bir şekilde tahmin etmek için makine öğrenimi algoritmaları da kullanılmalıdır.

• Gelecekteki çalışmalarda eklemeli üretim (3D baskı) ve diğer modern modül üretim teknikleri kullanılmalıdır.

• Yeni geliştirilecek modüllerin maliyetinin her zaman ticari modülden daha düşük olmasını sağlamak için maliyet-güç analizi yapılmalıdır.

• Modül testlerinin doğru şekilde yapılması ve modüllerin uygulamalarından önce testlerinin yapılması için yeni modül test sistemleri geliştirilmelidir.

KAYNAKLAR

A.F. Ioffe (1957) - TEMiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling -Infosearch, London.

Albatati, F., Attar, A., 2021. Analytical and Experimental Study of Thermoelectric Generator (TEG) System for Automotive Exhaust Waste Heat Recovery 14.

Aljaghtham, M., Celik, E., 2020. Numerical analysis of energy conversion efficiency and thermal reliability of novel, unileg segmented thermoelectric generation systems. Int J Energy Res 45, 8810-8823. https://doi.org/10.1002/er.6416

Bakhtiaryfard, L., Chen, Y.S., 2015. Design and Analysis of a Thermoelectric Module to Improve the Operational Life. Advances in Mechanical Engineering 7, 152419. https://doi.org/10.1155/2014/152419

Ballikaya, S., Chi, H., Salvador, J.R., Uher, C., 2013a. Thermoelectric properties of Ag-doped Cu2Se and Cu2Te. Journal of Materials Chemistry A 1, 12478–12484. https://doi.org/10.1039/c3ta12508d

Ballikaya, S., Oner, Y., Temel, T., Ozkal, B., Bailey, T.P., Toprak, M.S., Uher, C., 2019a. Thermoelectric and thermal stability improvements in Nano-Cu2Se included Ag2Se. Journal of Solid State Chemistry 273, 122–127. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2019.02.037

Ballikaya, S., Oner, Y., Temel, T., Ozkal, B., Bailey, T.P., Toprak, M.S., Uher, C., 2019b. Thermoelectric and thermal stability improvements in Nano-Cu 2 Se included Ag 2 Se. Journal of Solid State Chemistry 273, 122–127. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2019.02.037

Ballikaya, S., Sertkol, M., Oner, Y., Bailey, T.P., Uher, C., 2019c. Fracture structure and thermoelectric enhancement of Cu 2 Se with substitution of nanostructured Ag 2 Se. Physical Chemistry Chemical Physics 21, 13569–13577. https://doi.org/10.1039/C9CP00793H

Ballikaya, S., Uher, C., 2014. Enhanced thermoelectric performance of optimized Ba, Yb filled and Fe substituted skutterudite compounds. Journal of Alloys and Compounds. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.124

Ballikaya, S., Uzar, N., Yildirim, S., Salvador, J.R., 2013b. Electrical and thermal properties of Fe substituted double-filled Ba xYb yFe zCo 4-zSb 12 skutterudites. Journal of Solid State Chemistry 197, 440–446. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2012.08.025

Beekman, M., Morelli, D.T., Nolas, G.S., 2015. Better thermoelectrics through glass-like crystals. Nature Mater 14, 1182–1185. https://doi.org/10.1038/nmat4461

Biswas, K., He, J., Blum, I.D., Wu, C.-I., Hogan, T.P., Seidman, D.N., Dravid, V.P., Kanatzidis, M.G., 2012. High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures. Nature 489, 414–418. https://doi.org/10.1038/nature11439

Biswas, R., Mukherjee, S., Mallik, R.C., Vitta, S., Dasgupta, T., 2019. Ultralow thermal conductivity and low charge carrier scattering potential in Zn1-xCdxSb solid solutions for thermoelectric application. Materials Today Energy 12, 107-113. https://doi.org/10.1016/j.mtener.2018.12.014

Bjørk, R., 2015. The Universal Influence of Contact Resistance on the Efficiency of a Thermoelectric Generator. Journal of Elec Materi 44, 2869–2876. https://doi.org/10.1007/s11664-015-3731-7

Bjørk, R., Christensen, D. V., Eriksen, D., Pryds, N., 2014. Analysis of the internal heat losses in a thermoelectric generator. International Journal of Thermal Sciences 85, 12–20. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.06.003

Bocher, L., Aguirre, M.H., Robert, R., Logvinovich, D., Bakardjieva, S., Hejtmanek, J., Weidenkaff, A., 2009. High-temperature stability , structure and thermoelectric properties of CaMn 1 À x Nb x O 3 phases. Acta Materialia 57, 5667–5680. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.062

Brus, V.V., Gluba, M., Rappich, J., Lang, F., Maryanchuk, P.D., Nickel, N.H., 2018. Fine Art of Thermoelectricity. ACS Appl. Mater. Interfaces 10, 4737–4742. https://doi.org/10.1021/acsami.7b17491

Chen, J., Sun, Q., Bao, D., Liu, T., Liu, W.-D., Liu, C., Tang, J., Zhou, D., Yang, L., Chen, Z.-G., 2020. Hierarchical Structures Advance Thermoelectric Properties of Porous n-type β-Ag $_2$ Se. ACS Appl. Mater. Interfaces 12, 51523–51529. https://doi.org/10.1021/acsami.0c15341

Chen, J., Yan, Z., Wu, L., 1996a. The influence of Thomson effect on the maximum power output and maximum efficiency of a thermoelectric generator. Journal of Applied Physics 79, 8823–8828. https://doi.org/10.1063/1.362507

Chen, J., Yan, Z., Wu, L., 1996b. The influence of Thomson effect on the maximum power output and maximum efficiency of a thermoelectric generator. Journal of Applied Physics 79, 8823–8828. https://doi.org/10.1063/1.362507

Chen, W.-H., Wu, P.-H., Lin, Y.-L., 2018. Performance optimization of thermoelectric generators designed by multi-objective genetic algorithm. Applied Energy 209, 211–223. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.094

Chen, X., Cai, F., Dong, R., Lei, X., Sui, R., Qiu, L., Zeng, Z., Sun, W., Zheng, H., Zhang, Q., 2020. Enhanced thermoelectric properties of n-type Bi2Te2.7Se0.3 for power generation. J Mater Sci: Mater Electron 31, 4924–4930. https://doi.org/10.1007/s10854-020-03057-8

Choo, S., Ejaz, F., Ju, H., Kim, F., Lee, J., Yang, S.E., Kim, G., Kim, H., Jo, S., Baek, S., Cho, S., Kim, K., Kim, J.-Y., Ahn, S., Chae, H.G., Kwon, B., Son, J.S., 2021. Cu2Se-based thermoelectric cellular architectures for efficient and durable power generation. Nat Commun 12, 3550. https://doi.org/10.1038/s41467-021-23944-w

Demirci, Y., Yusuf, A., Hamawandi, B., Toprak, M.S., Ballikaya, S., 2021. The Effect of Crystal Mismatch on the Thermoelectric Performance Enhancement of Nano Cu2Se. Front. Mater. 7, 581138. https://doi.org/10.3389/fmats.2020.581138

Deng, S.K., Li, D.C., Shen, L.X., Hao, R.T., Takabatake, T., 2012. Sn-based type-VIII single-crystal clathrates with a large figure of merit. Chinese Physics B 21, 1–5. https://doi.org/10.1088/1674-1056/21/1/017401

Dong, H., Li, X., Huang, X., Zhou, Y., Jiang, W., Chen, L., 2013. Improved oxidation resistance of thermoelectric skutterudites coated with composite glass. Ceramics International 39, 4551–4557. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.11.051

Eom, Y., Wijethunge, D., Park, H., Park, S.H., Kim, W., 2017. Flexible thermoelectric power generation system based on rigid inorganic bulk materials. Applied Energy 206, 649–656. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.231

Erturun, U., Erermis, K., Mossi, K., 2014. Effect of various leg geometries on thermo-mechanical and power generation performance of thermoelectric devices. Applied Thermal Engineering 73, 128–141. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.027

Everredtronics thermoelectric module manufacturer. [WWW Document], n.d. URL https://www.everredtronics.com/Thermal.html (accessed 12.26.21).

Fan, P., Zheng, Z., Li, Y., Lin, Q., Luo, J., Liang, G., Cai, X., Zhang, D., Ye, F., 2015. Low-cost flexible thin film thermoelectric generator on zinc based thermoelectric materials. Appl. Phys. Lett. 106, 073901. https://doi.org/10.1063/1.4909531

Fan, S., Gao, Y., 2018. Numerical simulation on thermoelectric and mechanical performance of annular thermoelectric generator. Energy 150, 38–48. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.124

Feng, R., Tang, F., Zhang, N., Wang, X., 2019. Flexible, High-Power Density, Wearable Thermoelectric Nanogenerator and Self-Powered Temperature Sensor. ACS Appl. Mater. Interfaces 11, 38616–38624. https://doi.org/10.1021/acsami.9b11435

Feng, Y., Jiang, X., Ghafari, E., Kucukgok, B., Zhang, C., Ferguson, I., Lu, N., 2018. Metal oxides for thermoelectric power generation and beyond. Advanced Composites and Hybrid Materials 1, 114–126. https://doi.org/10.1007/s42114-017-0011-4

Forster, J.D., Lynch, J.J., Coates, N.E., Liu, J., Jang, H., Zaia, E., Gordon, M.P., Szybowski, M., Sahu, A., Cahill, D.G., Urban, J.J., 2017. Solution-Processed Cu2Se nanocrystal films with bulk-like thermoelectric performance. Scientific Reports 7, 1–7. https://doi.org/10.1038/s41598-017-02944-1

Fraisse, G., Ramousse, J., Sgorlon, D., Goupil, C., 2013. Comparison of different modeling approaches for thermoelectric elements. Energy Conversion and Management 65, 351–356. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.022

Gaurav, K., Pandey, S.K., 2017. Efficiency calculation of a thermoelectric generator for investigating the applicability of various thermoelectric materials. Journal of Renewable and Sustainable Energy 9, 014701. https://doi.org/10.1063/1.4976125

Ge, Y., Liu, Z., Sun, H., Liu, W., 2018. Optimal design of a segmented thermoelectric generator based on three-dimensional numerical simulation and multi-objective genetic algorithm. Energy 147, 1060–1069. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.099

Ge, Z.-H., Zhao, L.-D., Wu, D., Liu, X., Zhang, B.-P., Li, J.-F., He, J., 2016. Low-cost, abundant binary sulfides as promising thermoelectric materials. Materials Today 19, 227–239. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.10.004

Goldsmid, H.J., 2010. Introduction to Thermoelectricity, Springer Series in Materials Science. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00716-3

Hamawandi, B., Ballikaya, S., Batili, H., Roosmark, V., Orlovská, M., Yusuf, A., Johnsson, M., Szukiewicz, R., Kuchowicz, M., Toprak, M.S., 2020a. Facile Solution Synthesis, Processing and Characterization of n- and p-Type Binary and Ternary Bi–Sb Tellurides. Applied Sciences 10, 1178. https://doi.org/10.3390/app10031178

Hamawandi, B., Mansouri, H., Ballikaya, S., Demirci, Y., Orlovská, M., Bolghanabadi, N., Sajjadi, S.A., Toprak, M.S., 2020b. A Comparative Study on the Thermoelectric Properties of Bismuth Chalcogenide Alloys Synthesized through Mechanochemical Alloying and Microwave-Assisted Solution Synthesis Routes. Front. Mater. 7, 569723. https://doi.org/10.3389/fmats.2020.569723

Heremans, J.P., Jovovic, V., Toberer, E.S., Saramat, A., Kurosaki, K., Charoenphakdee, A., Yamanaka, S., Snyder, G.J., 2008. Enhancement of thermoelectric efficiency in PbTe by distortion of the electronic density of states. Science 321, 554–557. https://doi.org/10.1126/science.1159725

Högblom, O., Andersson, R., 2014. Analysis of Thermoelectric Generator Performance by Use of Simulations and Experiments. Journal of Elec Materi 43, 2247–2254. https://doi.org/10.1007/s11664-014-3020-x

Ibáñez, M., Luo, Z., Genç, A., Piveteau, L., Ortega, S., Cadavid, D., Dobrozhan, O., Liu, Y., Nachtegaal, M., Zebarjadi, M., Arbiol, J., Kovalenko, M. V., Cabot, A., 2016. High-performance thermoelectric nanocomposites from nanocrystal building blocks. Nature Communications 7, 1–7. https://doi.org/10.1038/ncomms10766

Im, J.-P., Kim, Jeong, Lee, J., Woo, J., Im, S., Kim, Y., Eom, Y.-S., Choi, W., Kim, Jun, Moon, S., 2020. Self-Powered Autonomous Wireless Sensor Node by Using Silicon-Based 3D Thermoelectric Energy Generator for Environmental Monitoring Application. Energies 13, 674. https://doi.org/10.3390/en13030674

Jia, X., Gao, Y., 2014. Estimation of thermoelectric and mechanical performances of segmented thermoelectric generators under optimal operating conditions. Applied Thermal Engineering 73, 335–342. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.069

Jung, S.-J., Shin, J., Lim, S.-S., Kwon, B., Baek, S.-H., Kim, S.K., Park, H.-H., Kim, J.-S., 2021. Porous organic filler for high efficiency of flexible thermoelectric generator. Nano Energy 81, 105604. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105604

Kalteh, M., Akhlaghi Garmejani, H., 2019. Investigating the influence of Thomson effect on the performance of a thermoelectric generator in a waste heat recovery system. International Journal of Green Energy 16, 917–929. https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1642896

Kim, C.S., Yang, H.M., Lee, J., Lee, G.S., Choi, H., Kim, Y.J., Lim, S.H., Cho, S.H., Cho, B.J., 2018. Self-Powered Wearable Electrocardiography Using a Wearable Thermoelectric Power Generator. ACS Energy Lett. 3, 501–507. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b01237

Kim, H., Ballikaya, S., Chi, H., Ahn, J.-P., Ahn, K., Uher, C., Kaviany, M., 2015. Ultralow thermal conductivity of β -Cu2Se by atomic fluidity and structure distortion. Acta Materialia 86, 247–253. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.008

Kim, J.H., Oh, S., Sohn, W.H., Rhyee, J.-S., Park, S.-D., Kang, H., Ahn, D., 2015. Thermoelectric, thermodynamic, and structural properties in Cu1.94A0.02Se (A=Al, Ga, and In) polycrystalline compounds. Acta Materialia 100, 32–38. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.08.022

Kim, Y., Yoon, G., Cho, B.J., Park, S.H., 2017. Multi-layer metallization structure development for highly efficient polycrystalline SnSe thermoelectric devices. Applied Sciences (Switzerland) 7, 1–8. https://doi.org/10.3390/app7111116

Kraemer, D., Jie, Q., McEnaney, K., Cao, F., Liu, W., Weinstein, L.A., Loomis, J., Ren, Z., Chen, G., 2016. Concentrating solar thermoelectric generators with a peak efficiency of 7.4%. Nat Energy 1, 16153. https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.153

Lamba, R., Kaushik, S.C., 2017. Thermodynamic analysis of thermoelectric generator including influence of Thomson effect and leg geometry configuration. Energy Conversion and Management 144, 388–398. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.069

Lee, M.-Y., Seo, J.-H., Lee, H.-S., Garud, K.S., 2020. Power Generation, Efficiency and Thermal Gerilmes of Thermoelectric Module with Leg Geometry, Material, Segmentation and Two-Stage Arrangement. Symmetry 12, 786. https://doi.org/10.3390/sym12050786

Li, D., Zhang, J.H., Li, J.M., Zhang, J., Qin, X.Y., 2020. High thermoelectric performance for an Ag $_2$ Se-based material prepared by a wet chemical method. Mater. Chem. Front. 4, 875–880. https://doi.org/10.1039/C9QM00487D

Li, S., Funahashi, R., Matsubara, I., Yamada, H., Ueno, K., Sodeoka, S., 2001. Synthesis and thermoelectric properties of the new oxide ceramics Ca3-xSrxCo4O9 + δ (x = 0.0-1.0). Ceramics International 27, 321–324. https://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00083-3

Li, X., Zhao, L., Yu, J., Liu, X., Zhang, X., Liu, H., Zhou, W., 2020. Water Splitting: From Electrode to Green Energy System. Nano-Micro Letters 12, 131-160 https://doi.org/10.1007/s40820-020-00469-3

Liu, H., Shi, X., Xu, F., Zhang, L., Zhang, W., Chen, L., Li, Q., Uher, C., Day, T., Snyder Jeffrey, G., 2012. Copper ion liquid-like thermoelectrics. Nature Materials 11, 422–425. https://doi.org/10.1038/nmat3273

Liu, J., Jia, Y., Jiang, Q., Jiang, F., Li, C., Wang, X., Liu, Peng, Liu, Peipei, Hu, F., Du, Y., Xu, J., 2018. Highly Conductive Hydrogel Polymer Fibers toward Promising Wearable Thermoelectric Energy Harvesting. ACS Appl. Mater. Interfaces 10, 44033–44040. https://doi.org/10.1021/acsami.8b15332

Liu, W.-D., Yang, L., Chen, Z.-G., 2020. Cu2Se thermoelectrics: property, methodology, and device. Nano Today 35, 100938. https://doi.org/10.1016/j.nantod.2020.100938

Liu, Z., Chen, G., 2020. Advancing Flexible Thermoelectric Devices with Polymer Composites. Adv. Mater. Technol. 5, 2000049. https://doi.org/10.1002/admt.202000049

Liu, Z., Wang, X., Wei, S., Lv, H., Zhou, J., Peng, P., Wang, H., Chen, G., 2021. A Wavy-Structured Highly Stretchable Thermoelectric Generator with Stable Energy Output and Self-Rescuing Capability. CCS Chem 3, 2404–2414. https://doi.org/10.31635/ccschem.021.202101077

Lu, Z., Zhang, H., Mao, C., Li, C.M., 2016. Silk fabric-based wearable thermoelectric generator for energy harvesting from the human body. Applied Energy 164, 57–63. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.038

Maduabuchi, C.C., Ejenakevwe, K.A., Mgbemene, C.A., 2021. Performance optimization and thermodynamic analysis of irreversibility in a contemporary solar thermoelectric generator. Renewable Energy 168, 1189–1206. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.130

Maduabuchi, C.C., Mgbemene, C.A., 2020. Numerical Study of a Phase Change Material Integrated Solar Thermoelectric Generator. Journal of Elec Materi 49, 5917–5936. https://doi.org/10.1007/s11664-020-08331-3

Maji, P., Makongo, J.P.A., Zhou, X., Chi, H., Uher, C., Poudeu, P.F.P., 2013. Thermoelectric performance of nanostructured p-type Zr0.5Hf 0.5Co0.4Rh0.6Sb1-xSnx half-Heusler alloys. Journal of Solid State Chemistry 202, 70–76. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2013.03.024

Mao, J., Iocozzia, J., Huang, J., Meng, K., Lai, Y., Lin, Z., 2018. Graphene aerogels for efficient energy storage and conversion. Energy Environ. Sci. 11, 772–799. https://doi.org/10.1039/C7EE03031B

Mao, J., Zhu, H., Ding, Z., Liu, Z., Gamage, G.A., Chen, G., Ren, Z., 2019. High thermoelectric cooling performance of n-type Mg_3Bi_2-based materials. Science 365, 495–498. https://doi.org/10.1126/science.aax7792

Meng, F., Chen, L., Sun, F., 2009. Performance optimization for two-stage thermoelectric refrigerator system driven by two-stage thermoelectric generator. Cryogenics 49, 57–65. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2008.11.005

Meng, J.-H., Wu, H.-C., Wang, T.-H., 2019. Optimization of Two-Stage Combined Thermoelectric Devices by a Three-Dimensional Multi-Physics Model and Multi-Objective Genetic Algorithm. Energies 12, 2832. https://doi.org/10.3390/en12142832

Mi, H.-X., Wu, M.-X., Cao, S., Huang, Z.-Y., Han, L., Xu, J., 2019. Effect of solder and barrier layer elements on the thermoelectric properties of $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$. Mater. Res. Express 6, 106310. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3cd5

Ming, T., Yang, W., Wu, Y., Xiang, Y., Huang, X., Cheng, J., Li, X., Zhao, J., 2017. Numerical analysis on the thermal behavior of a segmented thermoelectric generator. International Journal of Hydrogen Energy 42, 3521–3535. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.021

Moffat, R.J., 1988. Describing the uncertainties in experimental results. Experimental Thermal and Fluid Science 1, 3–17. https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X

Mytafides, C.K., Tzounis, L., Karalis, G., Formanek, P., Paipetis, A.S., 2021. Fully printed and flexible carbon nanotube-based thermoelectric generator capable for high-temperature applications. Journal of Power Sources 507, 230323. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230323

Net Zero by 2050 – Analysis [WWW Document], n.d. . IEA. URL https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050 (accessed 12.6.21).

Nozariasbmarz, A., Suarez, F., Dycus, J.H., Cabral, M.J., LeBeau, J.M., Öztürk, M.C., Vashaee, D., 2020. Thermoelectric generators for wearable body heat harvesting: Material and device concurrent optimization. Nano Energy 67, 104265. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104265

Ortega, S., Ibáñez, M., Liu, Y., Zhang, Y., Kovalenko, M. V., Cadavid, D., Cabot, A., 2017. Bottom-up engineering of thermoelectric nanomaterials and devices from solution-processed nanoparticle building blocks. Chemical Society Reviews 46, 3510–3528. https://doi.org/10.1039/c6cs00567e

Ouyang, Z., Li, D., 2016. Modelling of segmented high-performance thermoelectric generators with effects of thermal radiation, electrical and thermal contact resistances. Scientific Reports 6, 1–12. https://doi.org/10.1038/srep24123

Oztan, C.Y., Hamawandi, B., Zhou, Y., Ballikaya, S., Toprak, M.S., Leblanc, R., Coverstone, V., Celik, E., 2020. Thermoelectric Performance of Cu2Se Doped with Rapidly Synthesized Gel-Like Carbon Dots. Journal of Alloys and Compounds 157916. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157916

Pang, D., Zhang, A., 2020. Performance analysis of an annular thermoelectric generator considering Thomson effect and convection heat transfer at cold junction. Journal of Renewable and Sustainable Energy 12, 064701. https://doi.org/10.1063/5.0024430

Park, H., Eom, Y., Lee, D., Kim, J., Kim, H., Park, G., Kim, W., 2019. High power output based on watch-strap-shaped body heat harvester using bulk thermoelectric materials. Energy 187, 115935. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115935

Park, S.H., Jin, Y., Ahn, K., Chung, I., Yoo, C.Y., 2017. Ag/Ni Metallization Bilayer: A Functional Layer for Highly Efficient Polycrystalline SnSe Thermoelectric Modules. Journal of Electronic Materials 46, 848–855. https://doi.org/10.1007/s11664-016-4972-9

Park, S.H., Jo, S., Kwon, B., Kim, F., Ban, H.W., Lee, J.E., Gu, D.H., Lee, S.H., Hwang, Y., Kim, J.-S., Hyun, D.-B., Lee, S., Choi, K.J., Jo, W., Son, J.S., 2016. High-performance shape-engineerable thermoelectric painting. Nat Commun 7, 13403. https://doi.org/10.1038/ncomms13403

Poon, S.J., 2018. Recent advances in thermoelectric performance of half-heusler compounds. Metals 8. https://doi.org/10.3390/met8120989

Prado-Gonjal, J., Vaqueiro, P., Nuttall, C., Potter, R., Powell, A. V., 2017. Enhancing the thermoelectric properties of single and double filled p-type skutterudites synthesized by an up-scaled ball-milling process. Journal of Alloys and Compounds 695, 3598–3604. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.404

Qu, S., Chen, Y., Shi, W., Wang, M., Yao, Q., Chen, L., 2018. Cotton-based wearable poly(3-hexylthiophene) electronic device for thermoelectric application with cross-plane temperature gradient. Thin Solid Films 667, 59–63. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.09.046

Ren, W., Sun, Y., Zhao, D., Aili, A., Zhang, S., Shi, C., Zhang, Jialun, Geng, H., Zhang, Jie, Zhang, L., Xiao, J., Yang, R., 2021. High-performance wearable thermoelectric generator with self-healing, recycling, and Lego-like reconfiguring capabilities. Sci. Adv. 7, eabe0586. https://doi.org/10.1126/sciadv.abe0586

Rogl, G., Grytsiv, A., Rogl, P., Peranio, N., Bauer, E., Zehetbauer, M., Eibl, O., 2014. N-Type skutterudites (R,Ba,Yb)yCo4Sb12 (R = Sr, La, Mm, DD, SrMm, SrDD) approaching ZT ≈ 2.0. Acta Materialia 63, 30–43. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.09.039

Rojas, J.P., Conchouso, D., Arevalo, A., Singh, D., Foulds, I.G., Hussain, M.M., 2017. Paper-based origami flexible and foldable thermoelectric nanogenerator. Nano Energy 31, 296–301. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.11.012

Rojas Suárez, J.P., Medina Delgado, B., Orjuela Abril, M.S., 2020. Study of the Thomson effect on the performance of thermoelectric modules with application to the energy recovery. J. Phys.: Conf. Ser. 1708, 012022. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1708/1/012022

Roudebush, J.H., Toberer, E.S., Hope, H., Jeffrey Snyder, G., Kauzlarich, S.M., 2011. Crystal structure, characterization and thermoelectric properties of the type-I clathrate Ba8-ySryAl14Si32 ($0.6 \leq y \leq 1.3$) prepared by aluminum flux. Journal of Solid State Chemistry 184, 1176–1185. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2011.02.027

Rowe, D.M. (Ed.), 2006. Thermoelectrics handbook: macro to nano. CRC/Taylor & Francis, Boca Raton.

Shi, L., Huang, X., Gu, M., Chen, L., 2016. Interfacial structure and stability in Ni/SKD/Ti/Ni skutterudite thermoelements. Surface and Coatings Technology 285, 312–317. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.11.057

Shi, X., Yang, Jiong, Bai, S., Yang, Jihui, Wang, H., Chi, M., Salvador, J.R., Zhang, W., Chen, L., Wong-Ng, W., 2010. On the design of high-efficiency thermoelectric clathrates through a systematic cross-substitution of framework elements. Advanced Functional Materials 20, 755–763. https://doi.org/10.1002/adfm.200901817

Shi, Y., Wang, Y., Mei, D., Chen, Z., 2018a. Wearable Thermoelectric Generator With Copper Foam as the Heat Sink for Body Heat Harvesting. IEEE Access 6, 43602–43611. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2863018

Shi, Y., Wang, Y., Mei, D., Feng, B., Chen, Z., 2018b. Design and Fabrication of Wearable Thermoelectric Generator Device for Heat Harvesting. IEEE Robot. Autom. Lett. 3, 373–378. https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2734241

Shin, S., Bang, S., Choi, J., Son, H.-J., Yoon, H., Yun, H., Choi, J.-H., Wee, D., 2015. Power generation characteristics of a sandwich-type self-heating thermoelectric generator with spatially varying embedded heat source: A self-heating thermoelectric generator with spatially varying source. Int. J. Energy Res. 39, 851–859. https://doi.org/10.1002/er.3285

Shittu, S., 2020. Electrical and mechanical analysis of a segmented solar thermoelectric generator under non-uniform heat flux 18.

Song, B., Lee, S., Cho, S., Song, M.J., Choi, S.M., Seo, W.S., Yoon, Y., Lee, W., 2014. The effects of diffusion barrier layers on the microstructural and electrical properties in CoSb3 thermoelectric modules. Journal of Alloys and Compounds 617, 160–162. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.07.066

Stathopoulos, P., Fernàndez-Villa, J., 2018. On the Potential of Power Generation from Thermoelectric Generators in Gas Turbine Combustors. Energies 11, 2769. https://doi.org/10.3390/en11102769

Suarez, F., Parekh, D.P., Ladd, C., Vashaee, D., Dickey, M.D., Öztürk, M.C., 2017. Flexible thermoelectric generator using bulk legs and liquid metal interconnects for wearable electronics. Applied Energy 202, 736–745. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.181

Tang, X.F., Chen, L.D., Goto, T., Hirai, T., Yuan, R.Z., 2001. Synthesis and thermoelectric properties of filled skutterudite compounds CeyFexCo4-xSb12 by solid state reaction. Journal of Materials Science 36, 5435–5439. https://doi.org/10.1023/A:1012473428845

Teffah, K., Zhang, Y., Mou, X., 2018. Modeling and Experimentation of New Thermoelectric Cooler–Thermoelectric Generator Module. Energies 11, 576. https://doi.org/10.3390/en11030576

The Joule Heating Effect [WWW Document], https://www.comsol.com/multiphysics/the-joule-heating-effect (accessed 12.23.21).

Thomson effect | physics | Britannica [WWW Document], https://www.britannica.com/science/Thomson-effect (accessed 12.23.21).

Tyagi, K., Gahtori, B., Bathula, S., Jayasimhadri, M., Sharma, S., Singh, N.K., Haranath, D., Srivastava, A.K., Dhar, A., 2015. Crystal structure and mechanical properties of spark plasma sintered Cu2Se: An efficient photovoltaic and thermoelectric material. Solid State Communications 207, 21–25. https://doi.org/10.1016/j.ssc.2015.02.004

U.S. Geological Survey, 2020, Mineral commodity summaries 2020: U.S. Geological Survey, 200 p., https://doi.org/10.3133/ mcs2020

Wang, X., Liang, L., Lv, H., Zhang, Y., Chen, G., 2021. Elastic aerogel thermoelectric generator with vertical temperature-difference architecture and compression-induced power enhancement. Nano Energy 90, 106577. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106577

Wang, Y., Shi, Y., Mei, D., Chen, Z., 2018. Wearable thermoelectric generator to harvest body heat for powering a miniaturized accelerometer. Applied Energy 215, 690–698. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.062

Wang, Y., Shi, Y., Mei, D., Chen, Z., 2017. Wearable thermoelectric generator for harvesting heat on the curved human wrist. Applied Energy 205, 710–719. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.117

Wei, T.-R., Wu, C.-F., Li, F., Li, J.-F., 2018. Low-cost and environmentally benign selenides as promising thermoelectric materials. Journal of Materiomics 4, 304–320. https://doi.org/10.1016/j.jmat.2018.07.001

Wen, D.-L., Deng, H.-T., Liu, X., Li, G.-K., Zhang, X.-R., Zhang, X.-S., 2020. Wearable multi-sensing double-chain thermoelectric generator. Microsyst Nanoeng 6, 68. https://doi.org/10.1038/s41378-020-0179-6

Wen, D.-L., Liu, X., Bao, J.-F., Li, G.-K., Feng, T., Zhang, F., Liu, D., Zhang, X.-S., 2021. Flexible Hybrid Photo-Thermoelectric Generator Based on Single Thermoelectric Effect for Simultaneously Harvesting Thermal and Radiation Energies. ACS Appl. Mater. Interfaces 13, 21401–21410. https://doi.org/10.1021/acsami.1c03622

Wu, H.J., Wu, A.T., Wei, P.C., Chen, S.W., 2018. Interfacial reactions in thermoelectric modules. Materials Research Letters 6, 244–248. https://doi.org/10.1080/21663831.2018.1436092

Wu, T., Gao, P., 2018. Development of perovskite-type materials for thermoelectric application. Materials 11, 1–32. https://doi.org/10.3390/ma11060999

Wu, Y., Ming, T., Li, X., Pan, T., Peng, K., Luo, X., 2014. Numerical simulations on the temperature gradient and thermal gerilmes of a thermoelectric power generator. Energy Conversion and Management 88, 915–927. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.069

Xu, J., Wang, Hui, Du, X., Cheng, X., Du, Z., Wang, Haibo, 2021. Highly Stretchable PU Ionogels with Self-Healing Capability for a Flexible Thermoelectric Generator. ACS Appl. Mater. Interfaces 13, 20427–20434. https://doi.org/10.1021/acsami.1c03328

Yang, J., Chen, Y., Peng, J., Song, X., Zhu, W., Su, J., Chen, R., 2004. Synthesis of CoSb3 skutterudite by mechanical alloying. Journal of Alloys and Compounds 375, 229–232. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2003.11.036

Yang, L., Chen, Z.-G., Han, G., Hong, M., Zou, Y., Zou, J., 2015a. High-performance thermoelectric Cu2Se nanoplates through nanostructure engineering. Nano Energy 16, 367–374. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.07.012

Yang, L., Chen, Z.G., Hong, M., Han, G., Zou, J., 2015b. Enhanced Thermoelectric Performance of Nanostructured Bi2Te3 through Significant Phonon Scattering. ACS Applied Materials and Interfaces 7, 23694–23699. https://doi.org/10.1021/acsami.5b07596

Yin, E., Li, Q., Xuan, Y., 2019. Experimental optimization of operating conditions for concentrating photovoltaic-thermoelectric hybrid system. Journal of Power Sources 422, 25–32. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.03.034

Yu, C., Zhu, T.J., Shi, R.Z., Zhang, Y., Zhao, X.B., He, J., 2009. High-performance half-Heusler thermoelectric materials Hf1-x ZrxNiSn1-ySby prepared by levitation melting and

spark plasma sintering. Acta Materialia 57, 2757–2764. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.02.026

Yusuf, A., Ballikaya, S., 2022. Electrical, thermomechanical and cost analyses of a low-cost thermoelectric generator. Energy 241, 122934. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122934

Yusuf, A., Ballikaya, S., 2020. Modelling a Segmented Skutterudite-Based Thermoelectric Generator to Achieve Maximum Conversion Efficiency. Applied Sciences 10, 408. https://doi.org/10.3390/app10010408

Yusuf, A., Bayhan, N., Ibrahim, A.A., Tiryaki, H., Ballikaya, S., 2021a. Geometric optimization of thermoelectric generator using genetic algorithm considering contact resistance and Thomson effect. Int J Energy Res 45, 9382–9395. https://doi.org/10.1002/er.6467

Yusuf, A., Demirci, Y., Maras, T., Moon, S.E., Pil-Im, J., Kim, J.H., Ballikaya, S., 2021b. Experimental and Theoretical Investigation of the Effect of Filler Material on the Performance of Flexible and Rigid Thermoelectric Generators. ACS Appl. Mater. Interfaces acsami.1c20004. https://doi.org/10.1021/acsami.1c20004

Yusuf, A., Hassan, T., Bayhan, N., Ballikaya, S., 2020. Modelling of thermoelectric cooler driven by thermoelectric generator. 6.International student symposium, Sakarya, 2021.

Zhang, A.B., Wang, B.L., Pang, D.D., Chen, J.B., Wang, J., Du, J.K., 2018. Influence of leg geometry configuration and contact resistance on the performance of annular thermoelectric generators. Energy Conversion and Management 166, 337–342. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.042

Zhang, Z., Zhao, K., Wei, T.-R., Qiu, P., Chen, L., Shi, X., 2020. Cu $_2$ Se-Based liquid-like thermoelectric materials: looking back and stepping forward. Energy Environ. Sci. 13, 3307–3329. https://doi.org/10.1039/D0EE02072A

Zhao, Q., Wang, D., Qin, B., Wang, G., Qiu, Y., Zhao, L.-D., 2019. Synergistically optimized electrical and thermal transport properties of polycrystalline SnSe via alloying SnS. Journal of Solid State Chemistry 273, 85–91. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2019.02.038

Zhao, X., Han, W., Zhao, C., Wang, S., Kong, F., Ji, X., Li, Z., Shen, X., 2019. Fabrication of Transparent Paper-Based Flexible Thermoelectric Generator for Wearable Energy Harvester Using Modified Distributor Printing Technology. ACS Appl. Mater. Interfaces 11, 10301–10309. https://doi.org/10.1021/acsami.8b21716

Zybala, R., Wojciechowski, K., Schmidt, M., Mania, R., 2009. Junctions and diffusion barriers for high temperature thermoelectric modules, in: 11th International Conference and Exhibition of the European Ceramic Society 2009. pp. 341–344.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

☐ **Etik Kurul izni gerekmektedir.**

☒ **Etik Kurul izni gerekmemektedir.**

Aminu YUSUF
(İmza)

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Aminu YUSUF
(İmza)