

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TERMODİNAMİK BİLİM DALI**

**NANOAKIŞKAN KULLANIMININ TERMOELEKTRİK GÜÇ
ÜRETİMİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Damla OKULU

**Danışman
Doç. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL**



MANİSA-2020

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TERMODİNAMİK BİLİM DALI**

**NANOAKIŞKAN KULLANIMININ TERMOELEKTRİK GÜÇ
ÜRETİMİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Damla OKULU

**Danışman
Doç. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL**



MANİSA-2020

**Damla
OKULU**

**NANOAKIŞKAN KULLANIMININ TERMOELEKTRİK GÜÇ ÜRETİMİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

2020

TEZ ONAYI

Damla OKULU tarafından hazırlanan "**NANOAKIŞKAN KULLANIMININ TERMOELEKTRİK GÜÇ ÜRETİMİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**" adlı tez çalışması xx/xx/xxxx tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman **Doç. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL**
Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP**
Fırat Üniversitesi

Jüri Üyesi **Doç. Dr. Hayati MAMUR**
Celal Bayar Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Damla OKULU



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	II
ŞEKİLLER DİZİNİ	III
TABLO DİZİNİ.....	IV
TEŞEKKÜR	V
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
2.1. Termoelektrik Jeneratör (TEJ) Literatür Çalışması.....	4
2.2. Nanoakışkan Literatür Çalışması	14
2.2. Nanoakışkan Kullanımlı Termoelektrik Jeneratör Sistemi Literatür Araştırması	25
3. TERMOELEKTRİK	28
3.1. Seebeck Etkisi	29
3.2. Peltier Etkisi	30
3.3. Thomson Etkisi	31
3.4. Joule Etkisi	31
3.5. Kelvin İlişkileri.....	32
3.6. Termoelektrik Cihazlar	32
3.7. Figure of Merit	35
3.7.1. Termoelektrik Malzeme.....	35
4. TERMOELEKTRİK JENERATÖR (TEJ)	43
4.1. Termoelektrik Jeneratör (TEJ) Performans Analiz Denklemleri	45
4.2. Termoelektrik Jeneratör (TEJ) Enerji Dönüşüm Denklemleri.....	51
5. TASARLANAN TERMOELEKTRİK JENERATÖR SİSTEMİNDE KULLANILAN NANOAKIŞKANLAR	53
5.1. Nanoakışkan.....	53
5.1.1. Magnezyum oksit/Gümüş (MgO/Ag) Hibrit Nanoakışkan.....	61
5.1.2. Karbon Nanotüp (CNT) Nanoakışkan	65
6. COMSOL MULTIPHYSICS' DE NANOAKIŞKAN KULLANIMININ TERMOELEKTRİK JENERATÖR (TEJ) VERİMİNE ETKİ ANALİZİ	68
6.1. Comsol Multiphysics.....	68
6.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)	70
6.3. Modelin Comsol Multiphysics'de Analizi	71
6.4. Termoelektrik Jeneratör Sisteminin Tasarımı.....	72
6.5. Comsol Multiphysics Fizik Ara Yüzlerinde Gelişen Denklemler	78
6.6. Tasarlanan Modelin Sınır Şartları	81
6.7. Ağ Tabaka (Mesh İşlemi)	82
6.8. Modelin Simülasyonu ve Sayısal Analiz Sonuçları	84
6.8.1. Çözücü	84
6.8.2. Analiz Sonuçları	84
6.8.1. Analiz Sonuçlarının Değerlendirmesi.....	99
6.8.2. Elde Edilen Veriler ile Literatürdeki Benzer Çalışmaların Karşılaştırması	101
KAYNAKLAR.....	105
ÖZGEÇMİŞ.....	118

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	Seebeck katsayısı
Π	Peltier katsayısı
β	Thomson katsayısı
T	Sıcaklık (K)
I	Elektrik akımı
R	Direnç
P	Elektrik gücü
ρ	Yoğunluk
σ	Elektriksel iletkenlik
μ	Dinamik viskozite
C_p	Özgül ısı kapasitesi
V	Elektrik potansiyeli
A	Alan
h	Yükseklik
η	Termoelektrik jeneratör verimi
γ	Elektriksel direnç
φ	Elektrik skaler potansiyeli
\dot{m}	Kütle akış hızı
u	Akışkan hızı
Re	Reynolds sayısı
F	Hacim kuvveti
p	Basınç
Q	Isı kaynağı

ALT İNDİSLER

H, h	sıcak
C, c	soğuk
f, bf	baz akışkan
p	katı parçacık
nf	nanoakışkan
hnf	hibrit nanoakışkan

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Termoelektrik etkilerin çalışma prensibi	29
Şekil 3.2. Termoelektrik cihazları oluşturan modüller	33
Şekil 3.3. Figure of merit değerini etkileyen parametrelerin yük taşıyıcı konsantrasyonuna bağlılığı.....	38
Şekil 3.4. Malzemelerin enerji bant diyagramları.....	40
Şekil 3.5. Yarıiletken malzemelerin enerji bant diyagramları	41
Şekil 3.6. Termoelektrik sistemlerde kullanılan bazı malzemelerin figure of merit değerleri.....	42
Şekil 4.1. Çoklu modüllerin oluşturduğu termoelektrik jeneratör.....	44
Şekil 4.2. Harici bir yük direncine bağlı termoelektrik jeneratör modülü	46
Şekil 5.1. Nanoakışkanların ısı iletkenliğini etkileyen mekanizmalar	56
Şekil 5.2. Farklı nanoparçacıklar için 0,01 hacim oranında sıcaklığın bir fonksiyonu olarak su bazlı nanoakışkanın ısı iletkenlik değişimi	58
Şekil 5.3. Farklı parçacık boyutunda ve hacim oranında su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değişimi.....	59
Şekil 5.4. Farklı parçacık boyutlarında ve hacim oranlarında nanoakışkanların dinamik viskozite değişimleri.....	60
Şekil 5.5. Hibrit nanoakışkanı oluşturmak için kullanılan bazı farklı nanoparçacık kombinasyonları	62
Şekil 5.6. Mono MWCNT nanoakışkan ile hibrit Cu/MWCNT nanoakışkanın hacim oranına bağlı ısı iletkenlik değişimi.....	63
Şekil 5.7. Karbon nanotüplerin yapısal özelliği	66
Şekil 6.1. Comsol Multiphysics’de modellenmiş TEJ.....	73
Şekil 6.2. İki kanal arasına yerleştirilmiş TEJ.....	75
Şekil 6.3. Isı transferi ve akışkan akışının gerçekleştiği ara yüzeylerdeki sınır şartları	81
Şekil 6.4. Elektrik akımı fizik ara yüzünün sınır şartları	82
Şekil 6.5. Hesaplamalı alanın kafes dağılımı	83
Şekil 6.6. Nanoakışkanların farklı hacim oranlarındaki ısı iletkenlik değerleri	85
Şekil 6.7. Nanoakışkanların farklı hacim oranlarındaki dinamik viskozite değerleri	86
Şekil 6.8. Farklı Reynolds sayılarında suyun akış hızı	87
Şekil 6.9. Sabit bir Reynolds sayısında farklı hacim oranlarındaki su bazlı MgO/Ag hibrit nanoakışkanın akış hızı.....	88
Şekil 6.10. Farklı Reynolds sayılarında suyun sıcaklık dağılımı.....	89
Şekil 6.11. Nanoakışkanların farklı hacim oranlarına sahip olması durumunda sıcak tarafta absorbe edilen ısı miktarı	90
Şekil 6.12. Farklı Reynolds sayılarında su ve nanoakışkan kullanımında sıcak tarafta absorbe edilen ısı miktarı	91
Şekil 6.13. Sabit bir Reynolds sayısında (750) nanoakışkanların hacim oranlarının TEJ çıkış gücüne etkisi	92
Şekil 6.14. Sabit bir Reynolds sayısında (1500) nanoakışkanların hacim oranlarının TEJ çıkış gücüne etkisi	93
Şekil 6.15. Kullanılan akışkanların 1500 Reynolds sayısında TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyeline etkisi.....	94
Şekil 6.16. Farklı Reynolds sayılarında kullanılan akışkanların TEJ çıkış gücüne etkisi	96

Şekil 6.17. Farklı hacim oranlarına sahip nanoakışkanların TEJ çıkış gücüne etkisi	97
Şekil 6.18. Nanoakışkanların hacim oranlarındaki değişikliğin TEJ verimine etkisi	98
Şekil 6.19. Farklı Reynolds sayısındaki akışkanların TEJ verimine etkisi	99



TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 5.1. Nanoakışkanların ısı iletkenliğinin belirlenmesinde kullanılan bazı hesaplama modelleri	57
Tablo 5.2. Nanoakışkanların dinamik viskozite değerlerinin belirlenmesinde kullanılan bazı hesaplama modelleri.....	60
Tablo 6.1. Termoelektrik jeneratör sistemini oluşturan malzemelerin boyutu ..	72
Tablo 6.2. Termoelektrik jeneratör sistemini oluşturan katı malzemelerin özellikleri	74
Tablo 6.3. Su ve katı parçacıkların termofiziksel özellikleri.....	76
Tablo 6.4. Kafes bağımsızlık testi sonuçları: Üçte çeşitli Reynolds sayısı için ve çeşitli kafes boyutları için güç çıkış değerleri (% 2 katı hacim fraksiyonuna sahip CNT parçacıkları)	83



TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aőamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL' e, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Damla OKULU
Manisa, 2020



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NANOAKIŞKAN KULLANIMININ TERMOELEKTRİK GÜÇ ÜRETİMİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Damla OKULU

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL

Geleneksel akışkanlara göre daha yüksek ısı özelliklere sahip nanoakışkanlar, daha önce yapılmış çalışmalarda termoelektrik jeneratör (TEJ) sisteminde genellikle soğutucu iş akışkanı olarak kullanılmış ve TEJ veriminin artış göstermesini sağlamıştır. Bu çalışmada MgO/Ag-su hibrit nanoakışkan ve CNT-su nanoakışkanı sistem için gerekli sıcaklık farkını oluşturmak için hem sıcak hem de soğuk akışkan görevinde kullanılmıştır. Bahsedilen nanoakışkanların kullanımının sadece su kullanımına göre termoelektrik güç üretimi ve TEJ verimi üzerinde oluşturduğu değişiklikler araştırılmıştır. Akışkanlar 7 farklı Reynolds sayısında (100, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500) değerlendirilmiş olup, nanoakışkanlar 4 farklı hacim oranında (0,005, 0,01, 0,015, 0,02) ele alınmıştır. Tasarlanan modelde kullanılan tüm akışkanlar 323,15 K (T_h) ve 293,15 K (T_c) sıcaklık değerlerine sahiptir. Belirlenen parametrelerde modelin matematiksel hesaplamaları Comsol Multiphysics programında sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, MgO/Ag-su ve CNT-su nanoakışkanların kullanımında sadece su kullanımına göre TEJ elektrik potansiyeli, çıkış gücü ve veriminde artış olduğunu göstermiştir. Nanoakışkanlar, tüm hacim oranlarında suya göre daha yüksek elektrik potansiyeli ve çıkış gücü sağlamıştır. MgO/Ag-su nanoakışkanı sahip olduğu tüm hacim oranlarında diğer akışkanlara göre daha yüksek elektrik potansiyeli ve çıkış gücü elde edilmesini sağlamıştır. En yüksek TEJ elektrik potansiyeli ve çıkış gücüne, Reynolds sayısı 1500 alındığında, 0,02 hacim oranına sahip MgO/Ag-su nanoakışkan kullanımı ile erişilmiştir. Bu durumu sırasıyla CNT-su ve sadece su kullanımı takip etmiştir. Daha düşük Reynolds sayılarında daha düşük voltaj ve çıkış gücü elde edilmiş, Reynolds sayısındaki artış ile paralel olarak voltaj ve çıkış gücü de artış göstermiştir. En yüksek elektrik potansiyeli ve çıkış gücü MgO/Ag-su ile edilmesine rağmen en yüksek TEJ verim değeri 0,02 hacim oranına sahip 1500 Reynolds sayısında CNT-su nanoakışkan ile elde edilmiştir. Nanoakışkanlar tüm parametrelerde suya göre daha yüksek TEJ verimine ulaşılmasını sağlamıştır. Nanoakışkan kullanımının, TEJ elektrik potansiyeli, çıkış gücü, verim değerinde belirgin bir iyileşmeye neden olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: TEJ, MgO/Ag-su, CNT-su

2020, 118 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF USE NANOFUID ON THERMOELECTRIC POWER PRODUCTION

Damla OKULU

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL

Nanofluids have higher thermal conductivities as compared to conventional fluids and in the previous studies on the thermoelectric generators (TEG) system they increased TEG efficiency. In this study, MgO/Ag-water hybrid nanofluid and CNT-water nanofluid were used in both hot and cold fluid to obtain the required temperature difference for the system. Thermoelectric power generation and TEG efficiency are compared with that of system using water as heat transfer fluid. The system using water and nanofluids are evaluated in 7 different Reynolds numbers (100, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500) and nanofluids were considered in 4 different volume fractions (0,005, 0,01, 0,015, 0,02). All fluids used in the configurations have 323,15 K (T_h) and 293,15 K (T_c) temperature values. Finite element method in the Comsol Multiphysics program was used for the numerical simulations. The results showed that the use of MgO/Ag-water and CNT-water nanofluids increased TEG electrical potential, output power and efficiency as compared to using only water. Nanofluids have provided higher electrical potential and output power in all volume fractions compared to water. The highest TEG electrical potential and output power were achieved with the use of MgO/Ag-water nanofluid with 0,02 volume fraction when Reynolds number 1500 is considered. This situation was followed respectively by use CNT-water and only water. Although the highest electrical potential and output power are with MgO/Ag-water nanofluid, the highest TEG efficiency value was obtained with a CNT-water nanofluid of 0,02 volume fraction in 1500 Reynolds number. Nanofluids enabled higher TEG efficiency in all parameters compared to water. It was observed that the use of nanofluid results in a significant improvement in TEG electrical potential, output power and efficiency value.

Keywords: TEG, MgO/Ag-water, CNT-water

2020, 118 pages

1. GİRİŞ

Dünyanın artan nüfusu, büyüyen ekonomi ve gelişen sanayi ile birlikte insanların enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Yıllardır enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü karşılayan fosil kaynaklar (petrol, doğalgaz, kömür vb.) artan enerji talebi karşısında hızla tükenmektedir. Bilim insanları enerji gereksinimini karşılayamayacak düzeye yaklaşan bu kaynaklara alternatif olabilecek yeni enerji kaynaklarını araştırmakta ve var olan kaynakların en verimli şekilde kullanımıyla ilgili çalışmalar yapmaktadır. Yapılan araştırmalar doğrultusunda fosil kaynakların çevreye ve insan sağlığına verdiği zararlar da göz önünde bulundurularak enerji arayışı içinde yenilenebilir enerji kaynakları dikkat çekmektedir. Enerji sorununa çözüm oluşturabilecek yenilenebilir enerji doğal kaynakların işlenmesiyle kullanılabilir hale gelen sistemlerdir ve tükenmez kaynaklardan oluşturulan bu enerji sınırsız olarak sürdürülebilirdir. Su, rüzgar, dalga, biyokütle, hidrojen, jeotermal ve güneş yenilenebilir enerji kaynaklarına örnektir. Güneş radyasyonundan faydalanılarak fotovoltaik sistemlerle, hidrojen kaynağı yardımıyla yakıt hücrelerinde, rüzgar türbinleri kullanımıyla, sıcaklık farkının olduğu ortamlarda ve hidroelektrik uygulamalar ile elektrik üretimi mümkündür [1]. Yenilenebilir enerji sistemleri uzun yıllardır geliştirilmekte fakat düşük verimlilikleri geleneksel fosil kaynaklarının yerini almasına engel oluşturmaktadır. Doğadan yararlanılarak üretilen bu sınırsız enerji aynı zamanda çevre dostudur ancak bu sistemlerin düşük verimliliklerinin yanında yüksek maliyetli olmaları, kurulumlarının zor ve merkezi yerlerden uzak olması ve sürekli bakım onarım gerektirmeleri bu sistemlerin kullanımının yaygınlaşmasının önüne geçmektedir. Kritik bir nokta olan fosil yakıtların oluşturduğu enerji kaynaklarının sürekli tükenme eğilimi göstermesi, yenilenebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesinin ve yeni kaynak arayışının önemini her geçen gün arttırmaktadır. Alternatif kaynak arayışı içerisinde geri dönüşümlü olmaları, fazla yer kaplamamaları, hareketli parça bulundurmamaları, atık ısının değerlendirilmesine katkıda bulunmalarıyla dikkat çeken termoelektrik (TE) sistemler, araştırmacıların bu uygulamalara odaklanmasına neden olmuştur.

TE sistemler, ısı enerjisinin elektrik enerjisine veya elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümünü mümkün kılan sistemlerdir. İlk olarak Seebeck'in keşfiyle gündeme gelen TE olgusu enerji dönüşümünün ve güç üretimini sağlayan termoelektrik jeneratör (TEJ) tasarımının temelini oluşturmuştur. Seebeck olgusu, ısı

enerjisinden elektrik üretilebileceğini ifade eder. Daha sonra Peltier yaptığı çalışmayla, Seebeck olgusunun tersinin de mümkün olduğunu elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştürebileceğini belirtmiştir. Peltier'in yapmış olduğu bu keşif termoelektrik soğutucuların (TES) temelini oluşturur. TE cihazlar, termodinamik kanunlara ve TE etkilere bağlı olarak enerji dönüşümünü gerçekleştiren sistemlerdir. TE cihazlar istenilen boyutlarda tasarlanabilir bu nedenle kurulumları oldukça kolaydır. Ayrıca fotovoltaik sistemler, yakıt pilleri, jeotermal uygulamalar gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına uyarlanabilir ve hibrid bir sistem oluşturabilirler. Özellikle TEJ, enerjinin olduğu her ortamda varlığını sürdürebilir ayrıca atık ısının geri kazanımı sağlayan sistemlerde de kendine yer edinmiştir. TES'ler, soğutma gereksinimlerinin çok yüksek olmadığı yerlerde genellikle portatif uygulamalarda kullanılır. TE cihazlar, kullanım alanlarının çeşitliliği, fazla bakım onarım gerektirmemeleri, farklı sistemlere uygulanabilirliği gibi birçok avantaja sahip olmalarına rağmen kullanımları kısıtlıdır. Bunun en önemli nedeni bu cihazlarının verimlerinin düşük olmasıdır. Yaklaşık %5 civarı verime ulaşabilen TE cihazların verimini arttırmak için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Çalışmalar bu cihazların verimlerini etkileyen birçok parametre olduğu yönündedir. TEJ ve TES performansının, cihazları oluşturan termoelektrik modül (TEM) boyutunda farklılıklarla iyileşebileceği belirtilmiştir. Ancak bu cihazların performansı iki önemli parametredeki düzenlemelerle belirgin bir şekilde artış gösterebilir. Bunlar TEM'i oluşturan malzemelerin özellikleri ve ısı kaynaklarında ısı transferinin geliştirilmesidir. Özellikle TE cihazlarda kullanılan malzemelerdeki iyileştirmeye sistemin kendi içerisindeki ısı transferi gelişip, performansta artış sağlanabilir. TE cihazlar yarıiletken malzemenin keşfiyle önem kazanmıştır. TE özellikleri diğer malzemelere göre daha iyi olan yarıiletkenler bu cihazlar için en iyi seçenek olmuştur ancak istenilen performans sağlanamamış ve günümüzde hala yarıiletkenlerin gelişimiyle ilgili çalışmalar devam etmektedir.

Yapılan çalışmada, en etken parametrelerin bir diğeri olan ısı kaynaklarındaki ısı transferi davranışına odaklanılmıştır. TEJ'de güç üretimi için sıcaklık farkı oldukça önemli bir etkidir ve bu sıcaklık gradyanı farklı şekillerde oluşturulabilir. Bu çalışma tasarlanan TEJ iki kanal arasına yerleştirilip, kanallardaki ısı değiştirici görevindeki akışkanın ısı transferi özelliklerinin, cihaz performansı üzerindeki etkisini incelemektedir. Su, su bazlı MgO/Ag (magnezyum oksit-gümüş) hibrit nanoakışkan ve CNT (karbon nano tüp) nanoakışkan kanal içindeki akışı gerçekleştirilmiştir. Isı

transfer performanslarıyla ön plana çıkan nanoakışkanlar, yenilenebilir enerji sistemlerinde uzun süredir büyük bir öneme sahip olmuştur. Nanoakışkanlar, bir baz sıvı içerisine nano boyutlarda katı parçacıkların ilavesiyle oluşur ve eklenen parçacık, yüksek ısı iletkenliğe sahip olmasıyla, akışkanın ısı iletkenliğinde dolayısıyla ısı transfer performansında artış sağlar. Nanoakışkanlar, tıpkı TEJ'ler gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Yüksek ısı özellikli nanoakışkan, iş akışkanı göreviyle fotovoltaik sistemler, uzay uygulamalar, askeri gibi alanlarda yer edinmiştir. Seçilen su bazlı MgO/Ag ve CNT nanoakışkanlar daha önce pek çok sistemde kullanılmış ve sistemin performans artışı göstermesini sağlamıştır. Bu akışkanların ısı transfer özelliklerinin, tasarlanan TEJ çıkış gücü ve verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tasarlanan modelin analizi Comsol Multiphysics FEM (Finite Element Method) ile gerçekleştirilmiştir. Su, su bazlı MgO/Ag ve CNT nanoakışkan, sıcak akışkan (323,15 K) ve soğuk (293,15 K) akışkan olarak alınmış, farklı Reynolds sayılarında TE güç üretimine etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca, nanoakışkanların farklı hacim oranlarındaki etkisi de değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Termoelektrik Jeneratör (TEJ) Literatür Çalışması

TEJ'ler, atık ısının geri kazanımı ve güneş enerjisinden faydalanılan birçok yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu cihazların verimlerinin iyileştirilmesi üzerine halen çalışmalar yapılmakta ayrıca yeni kullanım alanlarında kendine yer bulmaktadır. Bu sistemler ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma yer almaktadır.

Liu ve ark. [2], yapmış oldukları çalışmada Bi_2Te_3 ve Sb_2Te_3 tabanlı mikro TEJ'i 200 μm uzunluğundaki cam sütunlarla tasarlamışlardır. Termoelektrik sütunlar, cam şablonların açık deliklerinde elektro birikimidir ve cam şablonlar, sütunların desteklenmesini sağlamıştır. Tasarladıkları mikro TEJ'de toplam 4 termokupl kullanılmış ve 138 K sıcaklık farkında tutmayı başarmışlardır. Bu koşullar altında cihazın her termokuplu için 10,22 mV çıkış voltajı iletilmiş, toplamda 40.89 mV maksimum çıkış voltajı elde edilmiştir ve cihazın maksimum çıkış gücü 19,72 μW olarak hesaplanmıştır. Daha önceki ince film biriktirme teknolojilerine dayanan çapraz düzlemlili mikro TEJ'lerle karşılaştırıldığında hem sıcaklık farkı olarak hem de termokupl başına düşen çıkış voltajı olarak en büyük değere ulaşmışlardır.

Chen ve ark. [3], $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.15}\text{S}_{0.15}$ alaşımli TE malzeme ile 254 adet TE elemanlı modül tasarlamışlar ve 300-500 K sıcaklık aralığında TE enerji üretimini, iki farklı sabit ısı kaynağı ve ısı akışı durumunda incelemişlerdir. Farklı enine kesitlerin sıcaklık dağılımına dayanarak bir ısı transferi analizi yapmışlar ve geleneksel Bi_2Te_3 tabanlı modüller ile tasarladıkları alaşımli modülleri karşılaştırdıklarında, önerilen sıcaklık, özellikle ısı akışı durumunda, sıcaklık farkı 60 K'den yüksek olduğunda tasarladıkları modüllerden daha yüksek bir voltaj elde edebileceklerini gözlemlemişlerdir. Sıcaklık farkı 200 K olduğunda, alaşımli ve geleneksel modül için elde ettikleri açık devre gerilimleri 10,90 ve 9,79 V ve maksimum çıkış gücü sabit sıcaklık ve ısı akışı durumlarında sırasıyla 8,8179 ve 7,1279 W olarak bulunmuştur. Sonuç olarak tasarladıkları alaşım malzemesinin performansının, 300-500 K aralığında geleneksel Bi_2Te_3 malzemesinden daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Shittu ve ark. [4], segmentli bir dairesel termoelektrik jeneratörün (SATEJ) termoelektrik ve mekanik performansını, sıcaklığa bağlı termoelektrik malzeme

özellikleri, bakır ve kaynak tabakasının elastoplastik davranışını dikkate alarak araştırmışlardır. Araştırmaları için Comsol Multiphysics’de üç boyutlu sonlu elemanlar analizini kullanmışlar ve tasarladıkları SATEJ modelini diğer TEJ’lerle kıyaslamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre SATEJ, sıcaklık farkı 100 K’den büyük olduğunda Bi_2Te_3 tabanlı dairesel termoelektrik jeneratöre (ATEJ) kıyasla daha yüksek bir verim değerine ulaşmıştır. Ayrıca SATEJ veriminin, 200 K sıcaklık farkında geleneksel Bi_2Te_3 TEJ’i ve skutterudit TEJ’ine göre %21,7 ve %82,9 daha fazla olduğu bulunmuştur.

Hiranandani ve ark. [5], sistemin TE performansını tahmin etmek için yeni bir mikro yakıcı ile entegre edilmiş TEJ için sayısal model geliştirmişlerdir. Oluşturdukları sistem, mikro ölçekli bir yakıcıdan ve yakıcıya monte edilmiş iki Bi_2Te_3 TEM’den oluşmaktadır. Yanıcı, diğer yanıcılara göre alev stabilitesini ve termal özelliklerini geliştirmek için geriye dönük basamaklara ve bir sirkülasyon kabına sahiptir. Entegre sistem için 8 V’luk açık devre voltajı ve 2,8 Ω yük direnci için, %6,8 oranında bir dönüşüm verimliliğinde 5,6 W güç çıkışı elde etmişlerdir. Sonuç olarak araştırmada elde ettikleri değerlerle, TEJ’ler üzerinde gelecekteki çalışmalara büyük bir itici güç sağlayacağı sonucuna varılmış, optimize edilmiş yakıcının, kuru bir hücreyle karşılaştırılabilir bir hacme sahip, elektrokimyasal piller için uygun bir yedek görevi görebileceği gözlemlenmiştir.

Zhao ve ark. [6], otomobil egzoz TEJ’in güç üretim performansını arttırmak için yaptıkları çalışmada bir ara akışkan TEJ sistemi oluşturmuşlardır ve bu sistemde, atık egzoz ısısı ara sıvının kaynama ve yoğunlaşması yoluyla aktarılmıştır. Sonuç olarak, egzoz kanalı ile TEM arasındaki ayrım, modülün sıcak tarafında daha yüksek bir ısı akısına neden olmuştur ayrıca oluşturdukları sistemin güç üretim özelliklerini analiz etmek için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçları geleneksel TEJ sistemi ile karşılaştırdıklarında, egzoz tarafındaki aynı ısı değişim alanı için, TEM alanı da %73,8 azaltıldığında optimum tepe çıkış gücü %32,6 artmıştır. Birim alan başına üretim kapasitesi, geleneksel TEJ sisteminin 5,12 katı olan 1162 W/m² tepe çıkış gücüne ulaşmıştır.

Lv ve ark. [7], TEJ ile ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalarda göz ardı edilmiş ısı kayıplarını içeren matematiksel model geliştirmişlerdir. Isı kaybının etkisini azaltmak veya ortadan kaldırmak, ısı kaybının etkilerini incelemek için farklı yalıtım dolguları

ile doldurulan bölümlenmiş TEM'ler üretmişler ve ısı kaybını azaltmanın TE dönüşüm performansı üzerindeki etkisini incelemek için deneysel cihazlar geliştirilmişlerdir. Sonuç olarak, yalıtım malzemelerinin doldurulmasının TE performansın iyileştirilmesine katkıda bulunduğunu, aerojel dolgulu modülün verimliliğinin doldurulmamış modülden %8,225 daha yüksek olduğunu göstermiş ve TEM'in verimliliğinin ideal ısı yalıtım malzemeleri eklenerek %9,12'ye kadar artırılacağı gözlemlenmiştir.

Sunawar ve ark. [8], güneş ışığına maruz kalan park edilmiş bir otomobil kabin sıcaklığının kademeli olarak artacağını buna bağlı olarak çevreyle kabin arasında oluşan sıcaklık farkının TEJ için uygun bir ortam olacağını belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada doğrudan güneşe park edilmiş gerçek ve model arabalar kullanarak sıcaklık dağılımını araştırmışlardır. Ortam sıcaklığına kıyasla, hem gerçek otomobil hem de model otomobil için sonuçlar, otomobil kabininde ısının büyük ölçüde arttığı yönündedir. Sistemde eTEJ HV37 jeneratör kullanarak yaptıkları hesaplamada modül başına 6,9 mW'a kadar güç üretmiştir ve 1 m² araba tavanına TEJ monte edilerek 280 W güç üretilebileceği sonucuna varmışlardır.

Omar ve ark. [9], 100 cc Honda EX5 Dream, motosiklet şasisinin alt kemiğinde atık ısı geri kazanımı için TEJ kurulumunun uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Motosiklet atık ısı geri kazanım sisteminin TEJ'ler arasındaki sıcaklık farkını korumak ve TEJ'lerin soğuk tarafındaki ısıyı dağıtmak için doğal konveksiyon pasif soğutma kanadını kullanmışlardır. Sistemi iki TEJ modülü için ayrı ayrı test etmişlerdir. Test sonuçlarına göre kullanılan TEJ'lerde 57,5°C ve 62,7°C sıcaklık gradyanı ve 1,677 V ve 1,704 V açık devre voltajı elde etmişlerdir. En yüksek sıcaklık farkı ve çıkış voltajı, her iki TEJ için 73,2°C ve 4,2 V olarak kaydedilmiştir ve aynı düzenlemede, elde edilen en yüksek güç çıkışı 551 mW değerindedir. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda motosiklet sürücüsü için akıllı telefonlar veya güç bankaları gibi küçük taşınabilir cihazları şarj etmede tipik bir motosikletin alt iskelet şasisinden atık ısı geri kazanımının uygulanabilirliğini doğrulamışlardır.

Punin ve ark. [10], şeker endüstrisinde düşük dereceli atık ısı geri kazanımı için tasarlanmış bir TEJ'ün termal iletkenlik ve elektrik enerjisi aktarım süreçlerini simüle etmek için sayısal bir model geliştirilmişlerdir. Çalışmada TES1-12706 ve TES1-12710'un dört TES modülünü ve 200°C sıcaklıkta düşük dereceli ısının test edilmesi

için SP1848-27145 SA ve TEJ1- 127-40-40-250'nin TEJ modüllerini seçmişlerdir. Test sonuçları, 10 mm kalınlığında bir alüminyum plakanın, TEJ sistemine kurulum için uygun olan ısı alışverişini sağladığını göstermiştir. TES1-12710 yaklaşık 1,65 Ω eşleştirilmiş bir yükte maksimum 126,15 W güç çıkışı üretmiştir ve TEJ sistemi, ısı enerjisinin %11,5'ini elektrik enerjisine dönüştürmüştür. Son olarak, TES1 12710'un elektrik enerjisi maliyetlerinin kWh başına 0,22 USD olduğu tahmin edilmiştir bu nedenle, mevcut çalışmadaki TES modülü, şeker kamışı endüstrilerindeki atık ısıdan güç üretimi için ilginç ve yeni bir alternatif olmuştur.

Sheikh ve ark. [11], A, B ve C olmak üzere üç farklı gruptaki dokuz tip ısı eşanjörünü üç boyutlu modellemişler ve taşıt egzozundan elektrik enerjisi elde etmek için çeşitli bölme düzenleri ile hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) analizi kullanılarak incelemişlerdir. A grubunun modellemesinde, ısı eşanjörünün girişindeki bölmelerin açısı ve kalınlığının etkisine odaklanmışlardır. B grubunda, bölmeler ve yükseklikleri arasındaki mesafeleri değiştirmişler ve C grubunda farklı düzenlemelerle daha büyük bölmeleri modellemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar basınç düşüşünün tüm modellerde izin verilen aralıkta olduğunu ve A grubundaki gaz akış hızının diğer modellerde incelenenle neredeyse benzer olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte A grubu modellemesinde üretilen güç diğer modellere göre en az %7,25 daha yüksek çıkmıştır. Sonuçlar ayrıca, ısı eşanjörünün orta bölümünde aynı koşullar altında, bölmelerin yüksekliğinin 8,46 mm'den 2,30 mm'ye düşürülmesinin, sistemin çıkış gücünde %10,88 azalmaya neden olacağını göstermiştir. Bölmeler arasındaki mesafenin 5,2 mm'den 16,8 mm'ye yükseltilmesi, çıkış gücünde %3,91 artışa neden olmuştur. Alabo [12], güç üretim kapasitesini ve termal verimliliğini belirlemek için Ge /SiGe tabanlı TEJ modüllerini test etmiştir. Bu modüller iki farklı boyutta tasarlanmış ve aynı sıcaklık gradyanında tutulmuştur. Cihazlar biri açık devre ve diğeri kapalı devre bağlantıları için iki set sıcaklık ve voltaj ölçümü almıştır. Ge/SiGe tabanlı TEJ modülünün güç üretme kapasitesini ve verimliliğini araştırmak için Seebeck voltajının deneysel ölçümleri kullanmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre nano boyutlardaki TEJ cihazının daha iyi performansa sahip olduğunu gözlemlemiştir. Bu durumu daha büyük boyuttaki TEJ cihazında 4,668 Ω temas direncine kıyasla nano boyutlardaki cihazın 1,64 Ω daha küçük temas direncine sahip olmasına bağlamıştır. Cihazların mikro ve nano ölçek seviyesine düşürülmesinin daha iyi performans verdiği sonucuna ulaşmıştır.

Kober [13], çalışmasında otomotiv araç ve TEJ arasındaki tüm sistem etkileşimlerin modellenmesini ve araç sistemi içindeki CO₂ azalmasını optimize etmiştir. Ayrıca, her TEJ tasarımı için maliyetleri hesaplamış ve yöntem, maliyet-fayda oranını değerlendirmiştir. Optimizasyon yöntemi, kompakt ve hafif olacak şekilde geliştirilmiş oldukça entegre bir TEJ tasarımı ile uygulanmıştır. TEJ tasarımındaki ve sistem optimizasyonundaki iyileştirmelerin kombinasyonu ile 267 W/kg gravimetrik güç yoğunluğu ve 478 W/dm³ hacimsel güç yoğunluğu elde etmiştir. Bu güç yoğunlukları, en son teknolojiye göre sırasıyla %900 ve %700 oranındadır. Optimizasyon yöntemini örnek olarak geleneksel bir araca (Volkswagen Golf VII) ve hibrid bir araca (Opel Ampera/Chevrolet Volt) uygulamıştır. Sonuç olarak, dünya genelinde uyumlu hafif hizmet sürüş testi çevrimi kapsamında, geleneksel araç için %2,2 ve hibrit araç için %3,4'e kadar tüketim ve CO₂ emisyonlarında azalma sağlanmıştır. Maliyet-fayda, geleneksel araç için 81,3 €/g/km ve şarj sürdürme modunda hibrid araç için 54,8 €/g/km değerindedir.

Liu ve ark. [14], 800 nm Bi₂Te₃/(Pt, Au) çoklu katmanlar ile n-tipi ve Sb₂Te₃ p-tipi ayakları, TE cihazı üretmek için ultra ince mikro elektromekanik sistemler (MEMS) ile tasarlamışlardır. Tavlanmış Bi₂Te₃/Pt çoklu katmanların güç faktörü, 303 K sıcaklığında 46,5 μW cm⁻¹K⁻² ulaşmıştır. Geleneksel Bi₂Te₃ tabanlı cihaza kıyasla %350'den fazla bir artışa karşılık gelmiştir. Tavlanmış Bi₂Te₃/Au çok katmanlı cihaz geleneksel Bi₂Te₃ cihazından daha düşük bir güç faktörüne sahip olmuştur. Sb₂Te₃-Bi₂Te₃/Pt çok katmanlı cihazın gücü 463 K sıcaklıkta 20,9 nW ölçülmüş ve hesaplanan maksimum çıkış gücü 10,5 nW'a ulaşmıştır. Sonuç olarak Sb₂Te₃ ve Bi₂Te₃ tabanlı cihazdan %39,5 daha yüksek ve Sb₂Te₃ ve Bi₂Te₃/Au çok katmanlı cihazlardan %96,7 daha yüksek bir değer elde etmişlerdir. Elde ettikleri veriler çeşitli uygulamalarda çok katmanlı yapılar ve yeni ultra ince MEMS TE cihazları kullanarak TE özelliklerini geliştirilebileceğini göstermiştir.

İnorganik yarıiletken malzemeden yapılmış TEJ pahalı, kırılmandır ayrıca esnek yapıya sahip değildir. Mehmood ve ark. [15], bu sınırlamaları göz önünde bulundurarak, azaltılmış grafen oksit, karbon nanotüpleri, poli (3,4-ethylenedioxythiophene)-polistiren sülfat, kurşun sülfür kompozit malzemelerden hem p hem n-tipi organik kompozitleri ile esnek yazdırılabilir TEJ geliştirmişlerdir. Tasarladıkları TEJ her biri 1,4 cm² etkili alana sahip bir prototip olarak 10 adet p ve n çiftinden oluşmaktadır. TEJ 77°C sıcaklık gradyanında 13 mV voltaj üretmiştir. Analiz

sonuçları tasarımlarının ölçeklenebilir, yazdırılabilir ve nispeten basit olduğunu ve ortaya çıkan yapının esnek, uyumlu ve yeniden yapılandırılabilir olduğunu göstermiştir.

Wang ve ark. [16], farklı çekim açılarına sahip X tipi TEM'in fizibilitesini incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemiyle üç boyutlu modelin 10, 20, 30, 40° olmak üzere dört çekme açısı altında sıcaklık, çıkış gücü, dönüşüm verimliliği ve termal stresini analiz etmişlerdir. Elde ettikleri değerler, TEM'in maksimum çıkış gücüne $\theta = 10^\circ$ ulaştığını ve geleneksel modüllerden %4,57 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Modeli mekanik açıdan incelediklerinde daha kısa ayakların sadece çıkış gücünü arttırmadığını mekanik performansını da olumlu yönde attırdığını gözlemlemişlerdir. X tipi yapının belirli bir çekme açısına sahip tasarımının, hem elektrik gücü hem de mekanik güvenilirlik açısından TEM'in performansını artırabileceği sonucuna varmışlardır.

Garud ve ark. [17], bir TEJ sisteminin elektro-termo-yapısal birleştirilmiş sayısal analiz yapmışlardır. Altı farklı iç kanat yapısına sahip sıcak ısı eşanjörlerini, birleştirilmiş sayısal yaklaşım kullanarak sıcaklık dağılımı, basınç düşüşü, net güç çıkışı, genel verimlilik ve stres açısından karşılaştırmışlardır. Kullandıkları eğimli kanatçıklara ve eğimli dikey kanatçıkların kombinasyonuna sahip ısı eşanjörleri, daha yüksek net güç çıkışları ve genel verimlilikler sergilemiştir. Eğimli ve kombinasyonlu ısı eşanjörleri düz kanatçıklara sahip ısı eşanjörüne göre 600°C gaz sıcaklığında sırasıyla %29 ve %35 daha yüksek çıkış gücüne sahiptir ayrıca sırasıyla %1,81 ve %1,88'lik daha yüksek verimlilik elde etmişlerdir. Mekanik açıdan değerlendirilen sistemde eğimli ve kombinasyonlu kanatçıklarla sisteme sırasıyla 25,87 ve 26,53 MPa gerilme indüklenmiştir.

Guo ve ark. [18], bir rejeneratör olan yüksek sıcaklıklı proton değişim membranı yakıt hücresini (HT-PMEFC) ve iki aşamalı termoelektrik jeneratörü (TTEJ) entegre eden yeni bir hibrit sistem önermişlerdir. Hibrit sistemin ve hibrit sistemdeki her bir bileşenin güç çıkışı, ekserji yok etme oranı, elektrik verimliliği ve ekserjetik verimliliği için matematiksel hesaplamalar yapmışlardır. Hesaplama sonuçları, HT-PEMFC/TTEJ hibrid sisteminin maksimum güç yoğunluğunun ve karşılık gelen elektrik verimliliğinin ve ekserjetik verimliliğinin, tek HT-PEMFC sistemine göre sırasıyla %11,8, %17,5 ve %17,7 oranında arttığını göstermiştir. Ayrıca önerilen

hibrid sistem için karşılık gelen ekserji yok etme oranı yoğunluğunun da %11,4 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir.

Yang ve ark. [19], TEJ'in p ve n-tipi ayaklarını Ag_2Te nanopartikül ince filmlerden oluşturarak mikro süper kapasitöre (TEJ-MSC) bağlı bir sistem tasarlamışlardır. Bu sistem 15,8 K gradyanında tutulduğunda 82 mV değerinde Seebeck voltajı üretmiştir ve %98 verimlilikle hızlı bir şekilde şarj edilme özelliği göstermiştir. TEJ-MSC'nin küçük boyutu ve inceliği $697 \mu Jcm^{-3}$ gibi yüksek hacimsel enerji yoğunluğu ile sonuçlanmıştır. Bu mükemmel performans sonuçları ısı işlem yoluyla iyonik iletkenliğin azalmasından kaynaklanmıştır ve elde ettikleri sonuçlar şarj süresini kısaltmış, deşarj ve şarj oranını önemli ölçüde artırmıştır.

Contento ve ark. [20], 4 adet optik konsantre güneş termoelektrik jeneratörü (STEJ) simüle etmiş ve bu sistemi malzeme özelliklerine bağlı olarak optimize etmiştir. Çeşitli termoelektrik malzemenin performansını 400-900 W/m^2 aralığında doğrudan normal ışınlamalar (DNI) ve sıcaklığa bağlı parametreler dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca STEJ birim alanı başına bacak en boy oranları, dolgu faktörü ve bacak sayısı da değişken olarak kullanılmıştır. Analiz sonuçları, skutteruditlerin, kurşun tellürür ve bizmut tellürürün, incelenen ısıl konsantrasyon aralığında ve 900 W/m^2 'ye eşit bir DNI için en yüksek verimlilikleri (≈ 7) sergilediğini göstermiştir. Bununla birlikte, skutteruditlerin ve kurşun tellürürün, bizmut tellürürden farklı olarak DNI seviyesinde çok hassas olduğu ve bu nedenle enerji dönüşümü için en iyi çözüm olarak nitelendirildiği bulunmuştur.

Bharti ve ark. [21], esnek serbest duran poliprol filmleri, bir oksitleyici olarak sulu $FeCl_3$ ve bir katkı maddesi olarak p toluen sülfonik asit (PTSA) kullanarak pirolün (sikloheksan içinde) ara yüzey kimyasal polimerizasyonu ile hazırlamışlardır. Bu polipirol filmlerindeki doping içeriğinin artması, Seebeck katsayısı $\sim 4-8 \mu V/K$ 'yi çok fazla etkilemeden elektrik iletkenliğinin $4.8 S/cm$ 'den $162,7 S/cm$ 'ye artmasına neden olmuştur. Katkılı serbest duran PPy filmlerde yüksek elektrik iletkenliği ile orta Seebeck katsayısının sinerjik kombinasyonu, $40,45 \mu W/mK^2$ 'lik en yüksek ortalama güç faktörü ile sonuçlanmıştır. Bir bilek bandı tipi termoelektrik güç jeneratörünü, yedi adet bağımsız PPy filmin entegre ederek tasarlanmışlardır. Tasarladıkları cihaz $80^\circ C$ 'lik bir sıcaklık farkında $336 \mu V$ değerinde açık devre voltajı ve $46 nA$ değerinde akım oluşturmuşlardır. Yaptıkları çalışma, bağımsız PPy filmler kullanılarak

tasarlanabilen giyilebilir enerji hasat cihazlarının geliştirilmesine yönelik yeni yollar ortaya koymuştur.

Al-Nimr ve ark. [22], TEJ kullanılmış kendinden beslemeli bir güneş enjektörlü soğutma sistemi tasarlamışlardır. Önerdikleri teorik modeli kütle, momentum ve enerji dengelerini temel alarak oluşturmuşlar ve daha sonra Engineering Equations Solver Yazılımı kullanılarak analiz etmişlerdir. Çalışmanın amacı elektrik üretmek için bir TE üretim sistemini, güneş ejektörlü soğutma sistemi ile entegre ederek sistemin yeteneğini incelemektir. TEM'leri entegre etmeden geleneksel sistemin performans katsayısı 0,3095 hesaplanmıştır. Bununla birlikte, sirkülasyon pompalarının elektrik yükünü kapsamak üzere güç üretimi için TE üretim sisteminin kullanılması, sistem performans katsayısını %13,3 oranında arttırmıştır. Önerilen sistemin ekserjetik verimliliğini %12,5 olarak hesaplamışlardır.

Bir perovskit güneş pilinin (PSC) bir TEJ ile hibrid bir sisteme entegre edilmesi, güneş ışığını ve PSC'den üretilen atık ısıyı aynı anda kullanarak güneş enerjisini elektriğe dönüştürebilir. Fu ve ark. [23] yaptıkları çalışmada perovskit güneş modülünün (PSM) ve TEJ'i seri halinde hibridize ederek geniş alanlı (16 cm^2) bir PSM-TEJ cihazı üretmenin fizibilitesini göstermişlerdir. PSC alt hücrelerinin seri ve paralel bağlı modlarının kombinasyonu ile, optimum bir PSM TEJ cihazı, 6,80V açık devre voltajı ve maksimum 103 mW güç çıkışı ile %12,7'lik güç dönüşüm verimliliği sağlamıştır. 100 mW/cm^2 koşulunda ışınlatma ve sürekli aydınlatma altında 400 saat sonra başlangıç PCE' sinin %85'ini korumuştur.

Elankovan ve ark. [24], sabit sıvı sıcaklığı, karşı akış, paralel akış ve atmosfere maruz kalan soğuk ısı emici gibi farklı termal sistem konfigürasyonlarına sahip uzun baca gazı kanallarından atık ısının geri kazanılması için TEJ performansının etkisini incelemişlerdir. Kanal uzunluğundaki artış, kanal boyunca akışkanın sıcaklık düşüşü nedeniyle TEJ güç üretimi üzerinde olumsuz bir etki göstermiş ve bu nedenle TEJ verimliliği, baca gazı ve temiz havanın sabit sıvı sıcaklıklarına kıyasla azalmıştır. Farklı termal sistem konfigürasyonlarının performansını analizi, $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ ısı transfer katsayısında 50 m kanal uzunluğu için sonuçlar, ortam konfigürasyonuna maruz kalan soğuk ısı emicinin %4,3 verimle 172,34 kW maksimum TEJ güç çıkışı üretme potansiyeline sahip olduğunu göstermiş, bu değerler sabit sıvı sıcaklığı konfigürasyonundan sırasıyla %40,22 ve %20,74 daha düşük çıkmıştır. Sonuç olarak,

ortam konfigürasyonuna maruz kalan ısı alıcının ekonomik olduğu ancak TEJ güç üretiminden sonra rejeneratif amaçlar için karşı akış konfigürasyonu önermişlerdir.

Marefati ve Mehrpooya [25], erimiş karbonat yakıt hücresi, TEJ'i, doğrusal fresnel güneş reflektörü ve güç türbininden oluşan birleştirilmiş bir ısı ve güç sürecini enerji, ekserji ve termodinamik bakış açılarıyla incelemişlerdir. Yakıt pili elektrik ve termal güç üretmiştir. Yakıt hücresinden gelen atık ısının bir kısmı ek güç üretmek için TEJ'e gönderilmiş ve geri kalanlar çevreye salınmıştır. Bir ısı eşanjörü olarak güneş alanı, önerilen prosesin gerekli termal gücünün bir bölümünü oluşturmuş ve 1728 kW kapasiteli lineer fresnel güneş reflektörü de kullanılmıştır. Sistemin sayısal modellemesi ve termodinamik analizini sırasıyla MATLAB ve HYSYS yazılımları kullanılarak yapmışlardır. Sonuçları, yakıt hücresi ve TEJ hibrit sisteminin araştırılması ve tüm kombine ısı ve güç işleminin araştırılması olarak iki şekilde incelemişlerdir. Elde edilen veriler sistemin toplam ve elektriksel verimliliğinin sırasıyla %64,93 ve %31,57 olduğunu göstermiş ayrıca, bu süreçte 41728,8 kW ekserji yok edilmiş ve süreç toplam ekserji verimliliği %0,12 olarak hesaplanmışlardır.

Ejenakevve ve ark. [26], bir güneş termoelektrik jeneratörün (STEJ) sıcak tarafı sıcaklığı, uzunluk ağırlıklı akım yoğunluğu, termoelement alan oranı, TE bacalarının uzunluğu ve termal konsantrasyon oranı (CR) açısından ekserji verimliliğinin optimizasyonunu incelemişlerdir. STEJ'lerin maksimum ekserji verimliliğinin elde edildiği optimal sıcak taraf sıcaklıkları optik konsantrasyonun yokluğunda, ancak 600-700 kadar büyük termal CR'lerle, bu ekserji verimleri 175-277°C sıcak taraf sıcaklık aralığı için %6-8 kadar olmuştur. Optimum sıcak yan sıcaklıkları TE cihazının figure of merit değerinin yanı sıra STEJ'in optik bileşeninin ve emicisinin özelliklerine göre değiştiğini bulmuşlardır. $ZT_m=1$ olan ve vakum koşullarında Bi_2Te_3 esaslı TE malzemesi için en uygun konfigürasyonu 1300 mm²'lik bir güneş yüzey emme alanı; hem p hem n bacaklar için 1 mm² kesit alanı ve 1 mm yükseklik ve yaklaşık %7'lik bir dönüşüm verimliliği veren 0,05'lik bir emisyonunda elde etmişlerdir.

Karalis ve ark. [27], karbon fiber (CF) malzemesinin takviyesiyle yapılmış tabakaları üst üste koyarak toplam da 8 kattan oluşan entegre TEJ tasarlamışlardır. M40B ve A-38 CF malzemelerini kullanarak sırasıyla p tipi için +33,85 $\mu V/K$ ve n tipi için -11,83 $\mu V/K$ değerinde Seebeck katsayısı elde etmişlerdir. Elektriksel iletkenlik, CF-M40B için $1,63 \pm 0,04 \times 10^5$ S/m ve CF-A38 için $1,14 \pm 0,03 \times 10^5$ S/m gibi yüksek

değerlere ulaşmıştır. Sistem, 33,4 mm uzunluğunda CF-M40B malzemesinden yapılmış toplam 10 adet termokupldan oluşmuştur. CFRP (karbon fiber takviyeli polimer) TEJ, 75 °C sıcaklık farkında $19,56 \pm 1,31$ mV elektrik potansiyeli, $0,87 \times 10^{-6}$ W çıkış gücü üretmiştir.

Haiping ve ark. [28], bir bileşik parabolik yoğunlaştırıcı, çift camlı PV paneli, bir mikro kanallı ısı borusu dizisi, TEJ, veri toplama ve kontrol sisteminden oluşan düşük konsantrasyonlu fotovoltaik/termal-TEJ (LCPV/T-TEJ) hibrit sistemi araştırmışlardır. TEJ, PV panelinin arka paneline doğrudan yapıştırılmamış, PV verimliliğini artırmak için LCPV/T sisteminin ısı borusu dizisinin soğuk tarafı ile ilişkili olacak şekilde tasarlamışlardır. LCPV/T ve TEJ' nin çevre koşulları, giriş ve çıkış sıcaklığı ve çıkış gücünü analiz etmişlerdir. Sistem, günlük ortalama %45 oranında ısı verimlilik, %11,8 oranında fotovoltaik (PV) elektrik verimliliği ve ortalama %0,23 oranında TEJ elektrik verimliliği ve %57,03 oranında toplam verimlilik sergilemiştir. Ayrıca, soğutma akışının sistem performansı üzerindeki etkilerini göz önünde bulundurmışlar ve sonuçlar PV ve TEJ verimliliklerinin her ikisinin de akışın artmasıyla arttığını göstermiştir.

Xuab ve ark. [29], derin uzay araştırmalarında kullanılmak üzere minyatür fan şekilli radyoizotop TEJ tasarlamışlardır. Tasarladıkları bu cihaz $5,75 \text{ cm}^3$ hacme, toplamda 8 adet modül ve 32 TE ayaktan oluşmuştur. Sisteme 1,5 W'lık ısı kaynağı yüklendiğinde, sıcaklık farkının 54,8 K, elektrik potansiyelinin ve maksimum çıkış gücünün sırasıyla 174,88 mV ve 333,2 nW olduğunu bulmuşlardır. TE ayak boyutu $9 \times 2 \text{ mm}^2$ olarak optimize ettiklerinde ve modül sayısını 8 aldıklarında, maksimum çıkış gücü 369,02 nW'a kadar yükselmiştir. Elde ettikleri değerler ile aşırı alan ortamlarındaki küçük hacimli cihazların enerji tedarik problemine yeni bir çözüm olabileceği düşünülmüştür.

2.2. Nanoakışkan Literatür Çalışması

Geleneksel sıvı içerisine ısı iletkenliği yüksek katı parçacıkların ilave edilmesiyle, ısı transfer performansı yüksek yeni bir akışkan olan nanoakışkanlar elde edilir. Bu akışkanlar son yıllarda yenilenebilir enerji teknolojilerinde özellikle soğutucu akışkan rolüyle, bu teknolojilerin veriminde önemli bir gelişme gösterilmesini sağlamıştır. Birçok alanda kullanılan bu yeni sıvıların, ısı özelliklerinin yükseltilmesi ve kullanıldığı alanlardaki sistemden daha iyi verim değerleri elde

edilmesi için araştırmacılar dikkatini nanoakışkanlara çevirmişlerdir. Literatürde bu akışkanlar ile ilgili çok sayıda çalışma yer almaktadır.

Bellos ve Tzivanidis [30], fotovoltaiik (PV) bir sistemde nanoakışkan kullanımının etkisini incelemişlerdir. Nanoakışkan olarak Syltherm 800/bakır oksit kullanmışlar ve baz sıvı ile karşılaştırmışlardır. İnceledikleri termal PV sistem, bir parabolik yoğunlaştırıcıya ve ters düz yalıtımlı bir alıcıya sahiptir ve analiz için termal, optik ve akış analizini gerçekleştirebilen SolidWorks Akış Simülasyonunu kullanmışlardır. Oluşturdukları sistem 200°C'ye kadar giriş sıvısı sıcaklığında çalışabilmiş ayrıca, nanoakışkan kullanımının incelenen tüm parametreler için hem termal hem de elektriksel performansta artışa yol açtığını bulmuşlardır (farklı akış hızları ve giriş sıcaklıkları kombinasyonları). 100°C'de bir giriş sıcaklığı ve nanoakışkan akış hızı 540 L/s için, ısıl verim ve elektrik verimi sırasıyla %46,84 ve %6,60 olarak bulmuşlardır ve termik, elektriksel, toplam ve ekserji verimliliğindeki artışları sırasıyla %1,66, %5,17, %2,08 ve %3,05 olarak hesaplamışlardır.

Hassan ve ark. [31], PV sistemde grafen/su nanoakışkan ve faz değişim malzemesi (RT-35HC) eşzamanlı kullanımının deneysel olarak incelemişlerdir. Bu hibrit PVT sistemin PV sıcaklığı, elektrik verimliliği, termal verimlilik ve genel verimlilik açasından performansı, PCM, PV/PCM sistemi ve geleneksel PV içindeki tüplerden akan su ile entegre PVT/PCM sistemi ile karşılaştırmışlardır. Değişen hacim konsantrasyonlarının (%0,05, %0,1, %0,15) grafen nano parçacıkların yanı sıra akış hızlarının (20, 30, 40 LPM) etkilerini de incelenmişler ve en iyi performansı %0,1 nano parçacık konsantrasyonu ve 40LPM akış hızı ile elde etmişlerdir. Oluşturdukları nanoakışkan bazlı PVT/PCM, su bazlı PVT/PCM sistemi ve PV/PCM sistemini geleneksel PV ile karşılaştırdıklarında elektrik verimliliğinde sırasıyla %23,9, %22,7 ve %9,1 artış olduğunu hesaplamışlardır. Ayrıca nano akışkan bazlı hibrit PVT/PCM sisteminin, su bazlı hibrit PVT/PCM sistemine kıyasla %17,5 daha yüksek termal verimlilik gösterdiği ve toplam verimliliğin %12 artırıldığını bulmuşlardır. Elde edilen sonuçlar, nanoakışkan ve PCM ile aynı anda entegre edilmiş hibrit PVT sisteminin en iyi performansı sağladığı yönündedir.

Najafia ve ark. [32], tipik bir mCHP sistemini gama tipi Stirling motoru ile entegre etmişlerdir. Çalışmalarında mCHP sisteminin polialkilen glikol (PAG) içinde dağılımış SiO₂ ve Al₂O₃ nano parçacıklarının viskozite ve ısıl iletkenlik üzerindeki etkisi

araştırmışlardır. Son olarak, Al_2O_3/PAG ve SiO_2/PAG nano-yağlayıcı arasındaki karşılaştırma, Al_2O_3/PAG 'ın daha iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir bu nedenle bulgular, mCHP sistemi için optimum ve en iyi performans nano-yağlayıcı olarak %0,01 hacim konsantrasyonuna sahip Al_2O_3/PAG olduğunu göstermiştir. Deneysel sonuçlara dayanarak, mCHP sisteminde SiO_2 ve Al_2O_3 nanoakışkanların kullanılmasının, mCHP'nin performansını arttırmak için yeni bir yol olarak sunulabileceği sonucuna varmışlardır.

Li ve ark. [33], etilen glikol bazlı β -siklodekstrin modifiye karbon nanotüp (CD-CNT) nanoakışkanını, doğrudan absorbeli güneş kolektöründe (DASC) kullanmışlardır. DASC sistemi için etilen glikol bazlı CD-CNT nanoakışkanların özgül ısı kapasitesi ve foto termal dönüşüm performansına odaklanmışlardır ve farklı hacim oranlarına (~%0,1 hacim) sahip bir dizi CD-CNT nanoakışkan hazırlamışlardır. CD-CNT yüklemelerinin artmasıyla özgül ısı kapasitesi azalmış ve özgül ısı kapasitesindeki en yüksek düşüş %0,1 hacim oranı için %9,07 olarak bulunmuştur ve sıcaklığın incelenen nanoakışkan özgül ısı kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Hacim oranı ve ışınlama süresi, foto-termal dönüşüm verimliliğine etmiş, uygun orana sahip nanoakışkanda, ışık ışınlama süresinin uzatılması ile foto termal dönüşüm performansı iyileştirilmiştir. Sonuçlar DASC sisteminde CD-CNT nanoakışkanın kullanımını desteklemiştir.

Pourfayaz ve ark. [34], yüksek sıcaklıkta 5 kW kapasiteli polimer yakıt hücresi ve 3 kW emici soğutucu ile entegre doğal gazdan zengin hidrojen üretmek için yakıt işleme ünitesi içeren hibrit sistem geliştirmişlerdir. Yakıcılardan gelen baca gazının atık ısısı amonyak su emme soğutucuda soğutma amacıyla kullanılmıştır. Hibrit soğutma sistemini, Aspen HYSYS yazılımıyla simüle etmişlerdir. HYSYS yazılımında nano partiküllerin özelliklerini tanımladıktan sonra, su bazlı nanoakışkanlar soğutma sistemindeki COP değerini arttırmak için emici sıvı olarak kullanmışlar ve etkilerini genel sistem performansı üzerinde değerlendirmişlerdir. Hibrit sistemin elektrik verimliliği ve genel verimliliği sırasıyla %36 ve %77,3 hesaplanmıştır. Gümüş nanoakışkan varlığında genel verimlilik %81'e kadar artmıştır ayrıca hibrit sistem için ekserji analizi yapmışlar ve sistemin elde edilen ekserji verimliliği %29 bulunmuştur.

Chen ve ark. [35], elektrikli ısıtıcının ısı transfer karakteristiklerini incelemek için Cu-EGW (etilen glikol ve DI-su karışımı), Al_2O_3/EGW , Fe_3O_4/EGW nanoakışkanlarını

kullanmışlardır. Baz sıvı olarak 4:6 etilen glikol ve deiyonize su karışımını kullanmışlardır ve nanoakışkanların kütle konsantrasyonunu %0,5 ila %2 arasında değerlendirmişlerdir. Ayrıca, bir elektrikli ısıtıcıda Fe_3O_4/EGW nanoakışkanın doğal konvektif ısı transferini, farklı manyetik alanların etkisini dikkate almışlardır. Elde ettikleri sonuçlar Cu/EGW nanoakışkanın ısı transfer performansının Al_2O_3/EGW ve Fe_3O_4/EGW nanoakışkanlardan daha yüksek olduğunu ve $Cu-EGW$ nanoakışkanın ısıtma verimliliğinin Cu nano parçacıklarının kütle konsantrasyonu ile arttığını göstermiştir. Baz sıvı EGW ile karşılaştırıldığında, %2 Cu/EGW , %1 Al_2O_3/EGW Al_2O_3/EGW ve %1 Fe_3O_4/EGW nanoakışkan ile doldurulmuş elektrikli ısıtıcıların denge sıcaklık değerleri sırasıyla %13,18, %3,77 ve %4,52 artmıştır. Manyetik alanın, Fe_3O_4/EGW nanoakışkanın ısı transfer arttırımı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Ek olarak, 100 mT'lik bir manyetik yoğunlukta %0,5 Fe_3O_4 nanoakışkan için, orta kanatçıktaki denge sıcaklığı %14,68 artmıştır.

Islam ve Shabani [36], TiO_2/EG (su-etilen glikol) nanoakışkanı, proton değişim membranı (PEM) yakıt hücrelerinde soğutucu olarak kullanmışlardır. Nanoakışkanın özellikle elektriksel iletkenliğine odaklanmışlardır. Hacimsel olarak %0,05 ila 0,5'lik oranına sahip TiO_2 nanoakışkanın (önceki çalışmalarda önerildiği gibi) 20-70°C (yani bir PEM yakıt hücresinin çalışma koşulu) aralığında deneysel olarak deneyimlerini incelemek için seçmişlerdir. TiO_2 nano parçacık oranının arttırılması, 60°C'de %0,5 hacim oranında nanoakışkanın elektriksel iletkenliği, baz akışkanınkinden 9 kat daha fazla olduğu bulunmuştur. Ayrıca, deneysel verilerle desteklenmemekle birlikte, nanoakışkanların elektriksel iletkenliği için standart korelasyonların sıcaklığa bağlı olmamıştır. Bu veriler daha sonra PEM yakıt hücrelerinde soğutucu olarak uygun kullanım aralıklarında farklı konsantrasyonlarda ve sıcaklıklarda TiO_2 nanoakışkanın elektriksel iletkenliğini tahmin etmek için yeni bir korelasyon kullanmışlardır.

Zhu ve ark. [37], doğrudan absorbeli güneş kolektörlerinin (DASC), gelişmiş güneş emilimini ve foto termal dönüşüm performansını gerçekleştirmek için plazmonik bimetalik alaşım ve karbon nano materyalleri içeren kompozit nanoakışkanlar hazırlamışlardır. ZIF-8'den türetilmiş azot katkılı grafitik polihedronlar (ZNG) taşıyıcı olarak alınarak, plazmonik bimetalik $Ag-Au$ alaşım nano parçacıkları, bir empenye-indirgeme yöntemi ile başarılı bir şekilde yüklenmiştir. $Ag-Au/ZNG$ 'lerin etilen glikol nanoakışkanları, görünür ve kızılötesine yakın spektrum aralığında daha düşük bir konsantrasyonda önemli geniş bant emilimi göstermiştir. Etilen glikol ile

karşılaştırıldığında, tüm ZNG nanoakışkanların foto termal dönüşüm etkinliği dikkate değer ölçüde artmıştır. Plazmonik bimetalik Ag-Au alaşımlı nano parçacıklar, foto termal dönüşüm verimliliğini daha da geliştirmiştir. Ag-Au ZNG nanoakışkanı için %74,35, Au/ZNG ve Ag/ZNG için sırasıyla %72,31, %70,35 hesaplanmıştır ve elde ettikleri sonuçlar DASC için nanoakışkanların güneş enerjisi emilimini artırmak ve güneş termal dönüşüm verimliliğini artırmak için yeni bir yol sunmuştur.

Said ve ark. [38], araba radyatörünün ısı transfer özelliğini nanoakışkan kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmalarında damıtılmış su (DW) ve etilen glikolde (EG) 50:50 hacimsel oranlarda dağılmış alüminyum oksit (Al_2O_3) ve titanyum dioksit (TiO_2) nano parçacıklarının kullanımını araştırmışlardır. Bu oksit esaslı nanoakışkanların seçimi korozyon önleyici özelliklerinden kaynaklanmış ayrıca gerekli olan termo fiziksel özellikler (boyut, yoğunluk, viskozite, termal iletkenlik, korozif davranış) ve uzun süreli stabilite (zeta potansiyeli) dahil olmak üzere nanoakışkanların kapsamlı bir karakterizasyonunu sunmuşlardır. Sonuçlar, %0,3'lük bir hacim fraksiyonunda Al_2O_3 kullanılarak termal performansın maksimum %24,21 oranında arttığını göstermiştir. Radyatör deneyleri için sürtünme faktörü ve performans değerlendirme kriteri (PEC) basınç düşmesini doğru değerlendirmek için hesaplamışlar ve PEC değerlerinin, önemli akış artışını gösteren 1,03-1,31 değer aralığında olduğunu bulmuşlardır.

Beigzadeha ve ark. [39], bir katı oksit yakıt hücresi (SOFC) tek etkili emilim soğutucu, binanın boruları ve radyatörleri arasında dolaşarak ısı alışverişini sağlayan nanoakışkandan oluşan hibrit sistemin enerji verimliliğini incelemişlerdir. Bakır (Cu), gümüş (Ag), bakır oksit (CuO) ve alümina (Al_2O_3) nano parçacıkları içeren altı nanoakışkan ve tek ve çok duvarlı karbon nano tüpler (SWCNT-MWCNT) kullanmışlar ve her birinin sistemin termal performansı üzerindeki etkisi incelemişlerdir. MWCNT esaslı nanoakışkanlar, emme soğutucularının performans katsayısını %27'ye kadar ve hibrit sistemin termal verimliliğini 0.82'den 0.886'ya kadar artırmıştır. Nano partikül konsantrasyonu artırılarak viskozite artırılacak, nanoakışkanlarda artan sürtünme faktörü ve basınç düşüşüne neden olacaktır. Eşik konsantrasyonları bakır oksit ve alümina nano parçacıkları için %2 ve bakır ve gümüş nano parçacıkları ve her iki nano tüp için %0,1 bulunmuştur.

Nithiyantham ve ark. [40], konsantre güneş enerji santrallerinde termal enerji depolama uygulamasında kullanılan erimiş tuzların termo fiziksel özelliklerini

arttırmak için iki Al_2O_3 bazlı nanoakışkan geliştirmişlerdir. Araştırma çalışmasında fiziksel bir çalkalama tekniği kullanılarak yeni basit kuru hazırlama yöntemi uygulamışlardır. Baz ötektik tuz, ağırlıkça %51 $NaNO_3$ -%49 KNO_3 içinde farklı şekil (küreler ve çubuklar) sahip, ağırlıkça %1 Al_2O_3 malzemelerinin iyi bir dispersiyonunu, 15 dakikalık bir çalkalama süresi ile elde etmişlerdir. Nanoakışkanları hazırlamak için iki farklı şekilli Al_2O_3 materyali, çubuklar (Al_2O_3 -NR parçacıklar (Al_2O_3 -NP) kullanılmıştır. Çalışmanın temel amacı, nanoparçacık şeklinin baz inorganik tuzun termofiziksel özelliklerinin artırılması üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Al_2O_3 -NP esaslı nanoakışkan ve Al_2O_3 -NR esaslı nanoakışkan, sırasıyla %3 ve %6 katı ve sıvı halde özgül ısı kapasitesinde (C_p) artış göstermiştir. Isıl iletkenlik analizi, Al_2O_3 -NP ve Al_2O_3 -NR için sırasıyla katı durumlarda %12 ve %20 ve sıvı durumda %16 ve %12 artış göstermiştir. Al_2O_3 -NP ve Al_2O_3 -NR nanoakışkan için sırasıyla %25 ve %37 viskozite artışları gözlemlenmiştir.

Abdallah ve ark. [41], fotovoltaik termal sistemde (PV/T), deneysel dış ortam testleri, ısı depolama/ısı emme maddesi olarak su bazlı MWCNT nanoakışkanı kullanmışlardır. Değişen nanoakışkan hacim oranının etkisi, sirkülasyon hızı 1,2l/dk'da sabit bir değerde ve hacim oranı %0 ila %0,3 aralığında incelemişlerdir. Deneysel sonuçları analiz ederek, baz sıvıya parçacık eklenmesinin, ısıl özelliklerin, PV/T sisteminin daha iyi termal ve elektrik verimliliğine sahip olmasına yol açan önemli bir artışa neden olduğu belirtmişlerdir. En iyi sistem verimleri %0,075 hacim oranında su bazlı MWCNT nanoakışkandan elde etmişlerdir. Bu konsantrasyonda, maksimum panel radyasyonunda, PV paneli için 12°C'lik bir sıcaklık azalması elde edilmiş ve bu da toplam sistem verimliliğinin %83,26 olmasını sağlamıştır. Ayrıca, gündüz boyunca ortalama 10,3°C'lik bir azalma elde etmişler ve toplamda %61,23'lük bir verim sağlamışlardır.

Huaxu ve ark. [42], spektral yarıma konsantre fotovoltaik termal (CPV/T) sisteminde uygun maliyetli glikol bazlı ZnO nanoakışkanın kullanımının uygulanabilirliğini deneysel olarak incelemişlerdir. İki eksenli güneş takip nanoakışkan bazlı spektral yarıma CPV/T sistemi tasarlamışlardır. Güneş enerjisi dönüşüm verimliliği, korelasyon katsayısı, glikol/ZnO nanoakışkan bazlı spektral yarıma CPV/T sisteminin termodinamik performansını su-polipirol ve su bazlı Ag/SiO₂ nanoakışkan bazlı spektral yarıma CPV/T sistemi ile karşılaştırmak için kullanıldı. Glikol-ZnO nanoakışkan içindeki ZnO parçacık konsantrasyonunun termal ve elektriksel

performanslar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Farklı tipteki parçacıkların maliyet karşılaştırmaları da yapılmıştır. Sonuçlar, glikol-ZnO nanoakışkan bazlı spektral yarma CPV/T sisteminin korelasyon katsayısının, sırasıyla su polipirol ve su bazlı Ag/SiO₂ nanoakışkan bazlı spektral yarma CPV/T sistemininkinden sırasıyla 0,218 ve 0,05 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca ZnO parçacıklarının maliyeti, Au, Ag ve polipirol parçacıklarının maliyetinden sırasıyla %0,13, %0,08 ve %0,17 daha azdır.

Al-Waeli ve ark. [43], termal iletkenliği arttırmak için nano-SiC ile karıştırılmış PCM (parafin mumu) ile dolu panele arka tarafa tutturulmuş tanktan ve nanoakışkanın (su SiC) geri dönüşümlü soğutma işlemine yaptığı hazneden oluşan PVT soğutma sistemi tasarlamışlardır ve bu sistemin ekonomik değerlendirmesi için MATLAB programı kullanmışlardır. Isı transferini daha fazla iyileştirmek için incelenen PVT bileşiğindeki nano PCM (parafin mumu) ile silikon karbid (SiC) nanoakışkan kullanmışlardır. Ekonomik değerlendirme yönü, yaşam döngüsünün maliyeti, kalem başına maliyet ve sistemin yüzde maliyetini sağlamıştır. İnverter verimliliği, spesifik verim ve kapasite faktörünü sırasıyla %97,3, 190,4 kWh/kWp ve %25,9 oranında hesaplamışlar ayrıca elektrik maliyeti ve geri ödeme süreleri sırasıyla 0.125 \$/kWh ve 5-6 yıl bulmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlar, incelenen sistemin ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu ve büyük umut vaat ettiğini göstermiştir.

Jia ve ark. [44], farklı nanoakışkanlar kullanarak bir PV/T toplayıcının sayısal analizini gerçekleştirmişlerdir. alışmalarında nanoakışkan tipi ve hacim konsantrasyonunun PV dönüşüm verimliliği, PV hücre sıcaklığı, termal ve elektrik gücü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, su bazlı Al₂O₃ nanoakışkanlı PV/T toplayıcının performanslarının, su bazlı TiO₂ kullanılan PV/T toplayıcıdan daha iyi olduğunu göstermiştir. PV/T kollektörünün elektrik gücü, nanoakışkan kütle akış hızı 0,03 kg/s alındığında, kütle akış hızının 0,0005 kg/s, 0,001 kg/s ve 0,01 kg/s alınmasından yüksek çıkmıştır. 0,03 kg/s alınan kütle akış hızında PV/T kollektörünün termal gücü, 0,0005 kg/s kütle akış hızı alınmışa göre %12,11 oranında daha yüksek bir değere ulaşmıştır. Ayrıca kanal yksekliliğinin azaltılması PV/T toplayıcının nanoakışkan tarafından çıkarılan ısısı artmış, PV/T toplayıcının 0,005 m ve 0,015 m tp çapı arasındaki en büyük termal güc farkını 24,00 W olarak hesaplamışlardır.

Ahmed ve Elsaid [45], su bazlı Al_2O_3 , TiO_2 nanoakışkan ve su bazlı Al_2O_3/TiO_2 hibrit nanoakışkan kullanılan soğutulmuş su iklimlendirme ünitesiyle ilişkili bir buhar sıkıştırma soğutma sisteminin performans özellikleri deneysel olarak araştırmışlardır. Nanoparçacık konsantrasyonu, nano parçacık tipi, nanoakışkan akış hızı, nano parçacık hibridizasyon oranları ve hava hızı gibi parametreleri dikkate almışlardır. Su bazlı Al_2O_3 ve TiO_2 nanoakışkanları %0,05, %0,1, %0,2, %0,3, %0,4, %0,6 ve %1 hacim oranlarında değerlendirilmiştir. Su bazlı Al_2O_3/TiO_2 hibrit nanoakışkan beş farklı konsantrasyonda ağırlıkça %0,1/0,1, 0,2/0,1, 0,3/0,1, 0,3/0,2 ve 0,3/0,3 kullanılmıştır. Deneyler, akışkan akış hızı 0,12-0,3 m³/s arasında değişirken 0,61-1,9 m/s aralığında hava hızında yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, tekli su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanın daha yüksek bir performans katsayısına ve bir soğutucu sisteminin sıvısının soğutulması için daha kısa bir süreye katkıda bulunduğunu göstermiştir. VCRS performans katsayısının daha yüksek değerleri, klimanın hava hızının daha düşük değerlerinde ve chiller ünitesinin nanoakışkan akış hızının daha yüksek değerlerinde elde edilmiştir. Su bazlı Al_2O_3 , su bazlı TiO_2 ile karşılaştırıldığında yaklaşık %4,1 daha düşük sıkıştırma oranı ve %5,3 oranında daha yüksek soğutma etkisi değerleri sağlamıştır.

Rahmanian ve Hamzavi [46], yaptıkları çalışmada fotovoltaik termal sisteminde (PVT) dolaşımdaki sıvının enerji tüketimi ile ilgili performansını araştırmak için, çalışma sıvısı olarak su bazlı CNT nanoakışkanı kullanmışlar ve ANSYS Fluent yazılımında simüle etmişlerdir. Ayrıca PV modülünün ısını daha verimli toplamak için üç ısı toplayıcı konfigürasyonu modellemişler ve CNT konsantrasyonu ve nanoakışkan akış hızının PVT sisteminin elektriksel ve termal verimliliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. %0,1 hacim oranı ve 50 L/s akış hızına sahip CNT nanoakışkan ile PVT sisteminin elektrik verimliliği, 40°C ortam sıcaklığında PV sistemine kıyasla %11 artmıştır. Nanoakışkan ısıl iletkenliğin darbe yoğunluğunu gösteren duyarlılık analizi yaptıklarında PVT sistemine 15 W'lık bir pompa gücü uygulanmasının elektrik verimliliğini %13,9'dan %12,9'a düşürdüğünü göstermiştir. Ek kazançlı elektrik enerjisini pompalama sisteminin enerji tüketimi ile karşılaştırmak için bir soğutma verimliliği katsayısı (CE) sunulmuştur. Nanoakışkanın ısıl iletkenliğini artırarak, CCE 25 W pompa için 0,985'den, 20 W pompa için 1,015'e yükselmiştir.

Choudhary ve ark. [47], damıtılmış su/etilen glikol (EG/DW) bazlı MgO (magnezyum oksit) nanoakışkanın stabilitesi ve bunun düz levha güneş kollektörünün (FPSC) termal performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Setil trimetil amonyum bromür (CTAB) yüzey aktif maddesini karışıma eklemişler ve süspansiyonu stabilize etmek için sonike etmişlerdir. Kararlılık, zamanın bir fonksiyonu olarak farklı nano parçacık konsantrasyonlarında (%0,08-%0,4) analiz edilmiştir. FPSC'nin termal performansını, değişen akış hızı (0,5-2,5 Lit/dak) altında farklı parçacık konsantrasyonlarında (%0,08 -%0,2) araştırmışlardır. Nanoakışkan karakterizasyonu; zeta potansiyeli ve U–V spektroskopisi, nanoakışkanların %0,2 hacim konsantrasyona kadar 15 günden fazla stabil olduğunu ortaya koymuştur. Daha yüksek hacim fraksiyonunda (% 0,4), aglomerasyonun bir sonucu olarak, nanoakışkan kararsız hale gelmiştir. Kollektörün en yüksek ısıl verimi, 1,5 Lit / dk'da %0,2 hacim oranı için %69,1 ile elde edilmiş, sadece EG/DW akışkanına göre %16,7 oranında bir artış göstermiştir. Sonuçlar, özdeş enerji faktörünün aynı parametrik durumda %16,74 arttığını ve ısı kaybı parametresinin %52,2 azaldığını göstermiş ve bu doğrultuda FPSC'de MgO nanoakışkan kullanımını alternatif oluşturmuştur.

Tong ve ark. [48], ağırlıkça 8:2 oranında su ve etilen glikol bazlı Fe₃O₄ nanoakışkanın ve aynı baz sıvı için MWCNT/Fe₃O₄ hibrit nanoakışkanın termal, optik ve foto-termal enerji dönüşüm özelliklerini, çeşitli koşullar altında deneysel olarak incelemişlerdir. Su/EG bazlı Fe₃O₄ nanoakışkanın ve MWCNT/Fe₃O₄ hibrit nanoakışkanın en yüksek ışık geçirgenlikleri sırasıyla %89 ve %29 bulunmuştur. Ayrıca Fe₃O₄ ve MWCNT/Fe₃O₄ nanoakışkanların maksimum ısıl iletkenliklerini, ağırlıkça %0,01 konsantrasyonunda sırasıyla 0,541 ve 0,562 W/m°C hesaplamışlardır. Sonuç olarak yüksek miktarda MWCNT nano parçacık içeren MWCNT/Fe₃O₄ hibrit nanoakışkan, aynı ağırlık konsantrasyonunda Fe₃O₄ nanoakışkandan neredeyse iki kat daha yüksek foto termal enerji dönüşüm verimlilik değeriyle sahip çıkmıştır bu nedenle termal sistemdeki ısı transfer verimliliğini artırma potansiyeli yüksektir.

Nazari ve ark. [49], tek eğimli termoelektrik yoğuşma kanalı ile montelenmiş güneş enerjisi sisteminde su bazlı CuO₂ (bakır oksit) nanoakışkanın performansını incelemişlerdir. Oluşturdukları sistemde dış kanalın duvarlarının etrafına dört TES modülü monte etmişler ve su bazlı CuO₂ nanoakışkanı farklı hacim oranlarında kullanılmışlardır. TE yoğuşma kanalı ile donatılmış güneş enerjisinin üretkenlik, enerji ve ekserji verimliliğinin sırasıyla yaklaşık %38,5, %38,9 ve %31,2 oranında arttığını

gözlemlemiştir. Bu durumda, havza suyuna hacimsel olarak %0,08 oranında CuO_2 nano parçacık ilavesiyle, verimlilik, enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla yaklaşık %82,4, %81,5 ve %92,6 artış göstermiştir.

Selimefendigil ve Öztıp [50], 3 boyutlu bir boşlukta dahili T şeklinde adyabatik bir engelle su bazlı CNT nanoakışkanın doğal konveksiyonunu incelemiştir. Muhafazanın soğuk yüzey sıcaklığı, TES kullanılarak kontrol edilirken, boşluğun sıcak yüzeyi eğimli hale getirmişler ve sayısal simülasyonlar için Galerkin sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. TES'in akım akısı ($0,01 \text{ A/mm}^2$ - $0,04 \text{ A/mm}^2$ arasında), ortam sıcaklığı (298 K-313 K), 3D boşluğun yan yüzeyinin eğimi (0° - 40° arasında), T şeklindeki engelin eğimi (-90° ve 90°), engelin boyutu (0,1 H ve 0,4 H arasında) ve katı nanoparçacık hacim fraksiyonunu (%0 ila 4 arasında) gibi parametrelerin doğal konvektif ısı transfer özellikleri üzerindeki sayısal değerini incelemiştir. Lokal ve ortalama ısı transfer oranlarının, TE elemanın akım akısının ve katı nanoparçacık hacim fraksiyonunun daha yüksek değerleriyle arttığı, etkinin termoelektrik elemanın yüksek sıcak yan sıcaklığı ve boşluk yan yüzey eğim açısı ile ters orantılı olduğunu gözlemlemiştir. CNT nano parçacık katkısı ile ısı transferi artırımı için önemli bir parametre olmuş ve en yüksek katı nanoparçacık hacim fraksiyonunda ortalama Nusselt sayısında %128 artış gözlemlemiştir.

Contreras ve ark. [51], otomotiv radyatörlerinde eşit miktarda su ve etilen glikol bazlı grafen-gümüş nano parçacıklardan oluşan nanoakışkanların termo hidrolik performansını incelemiştir. Nanoakışkanları, %0,01, %0,05 ve %0,1 hacim konsantrasyonlarında yüksek basınçlı homojenizasyon yöntemiyle hazırlamışlardır. Nanoakışkanlar, bir rüzgar soğutma tüneline takılan bir otomotiv radyatöründe test edilmiş ve otomotiv soğutma sisteminin çalışmasını simüle etmişlerdir. Deneyleri, soğutma suyu giriş sıcaklıkları 55 ila 85°C arasında, 0,08 ila 0,11 kg/s arasındaki kütle akış hızlarında gerçekleştirmişler, radyatördeki hava hızı 2,1 m/s'de sabit değerde tutulmuş ve test edilen akışkanların ısı transfer oranı ve pompalama gücü, öngörülen test koşulları altında belirlemiştir. Nanoakışkanların yüksek sıcaklıklarda ve kütle akış hızlarında, pompalama gücü %4,1'e kadar artış göstermiştir. Sonuç olarak gümüş nanoakışkanlar ısı transfer oranında %4,4'e kadar bir artış üretmiş, grafen örnekleri baz sıvı ile karşılaştırıldığında termohidrolik performansta bir düşüş göstermiştir.

Zakaria ve ark. [52], PEM yakıt hücresi soğutma sisteminde bir soğutma plakası ortamında termik akışkanların davranışının ayrıntılı analizi yoluyla silikon dioksit (SiO_2) nanoakışkan soğutucuların geleneksel damıtılmış suya alternatif olarak uygulanmasının fizibilitesini değerlendirmişlerdir. %0,1, %0,3 ve %0,5 hacim konsantrasyonlarında SiO_2 nano parçacıklarını damıtılmış su içinde dağıtmışlar ve paralel kanallı bir soğutma plakası sisteminde test etmişlerdir. 750 ila 900 arasında Reynolds sayısına sahip nanoakışkanlar, geleneksel su soğutucularına kıyasla ortalama plaka sıcaklıklarını %15-20 oranında azaltmıştır. Nanoakışkanlar aynı zamanda soğutma verimliliğini benzer bir farkla arttırmış, ayrıca yağın ısı aktarım katsayısını 2700 ve 4400 $\text{W/m}^2\text{°C}$ arasında bir aralığa yükseltmiştir. Bununla birlikte, ilave viskoz etki nedeniyle gerekli pompalama gücü de arttırıldı. Elde ettikleri sonuçlarla, SiO_2 nanoakışkanları ve soğutma plakası tasarımı gelecekteki yağın tasarımlarında gelişmiş PEM yakıt hücresi termal yönetim uygulaması için olası seçenekler arasına girmiştir. Alshaheen ve ark. [53], bir fotovoltaiik termal sistemde bir soğutucu sıvı olarak su bazlı karbon nano tüp nanoakışkanların kullanılmasının etkilerini hem enerji hem de ekserji açısından deneysel olarak incelemişlerdir. Baz akışkan olarak kütlece %0,05 oranında deiyonize su seçilmiş ve MWCNT, SWCNT ve GNP nano parçacıklar kullanılmışlardır. Çeşitli kütle akış hızlarını araştırmışlar ve sonuç olarak, 50 kg/h 'lik optimum kütle akış hızını seçmişlerdir. Bu şartlarda su bazlı GNP, SWCNT, MWCNT nanoakışkan kullanımı, toplam ortalama enerji verimliliğini saf su ile karşılaştırıldığında sırasıyla %19,3, %15,24 ve %9,46 arttırmıştır. Ek olarak, su bazlı GNP, SWCNT, MWCNT, modülün toplam ortalama entropi üretimini saf suya göre sırasıyla %2,88, %1,23 ve %0,82 azaltmıştır. Su bazlı GNP nanoakışkan uygulamasının, diğer soğutma sıvısı sıvıları arasında modül performansında daha fazla iyileşmeye yol açtığını bulmuşlardır.

Salari ve ark. [54], su bazlı MgO, MWCNT nanoakışkan ve MgO/MWCNT hibrit nanoakışkan çalışma sıvıları ile faz değişim malzemesi sistemine entegre üç boyutlu bir fotovoltaiik termal sistemi araştırmışlardır. Kolektördeki sıvı akış rejiminin, sistemdeki nanoakışkanı modellemek için laminar, tamamen gelişmiş, düzgün ve sıkıştırılmaz olduğunu varsaymışlardır. Çalışma sıvısı tipi, nanoakışkan kütle fraksiyonu ve faz değişim tabakası kalınlığı gibi çeşitli parametrelerin sistemin termal ve elektriksel performansı üzerindeki etkisini incelemek için bir parametrik analiz yapmışlardır. Ayrıca farklı bölümler için sistemdeki faz değişiminin sıcaklık dağılımı

incelenmiştir. MWCNT en yüksek toplam enerji verimliliğine ve MgO nanoakışkan en düşük toplam enerji verimliliğine sahip olmuştur. Ağırlıkça %6'lık kütle oranı için, sistemin su, MgO, MWCNT nanoakışkan ve MgO/MWCNT hibrit nanoakışkan içeren toplam enerji verimliliğini sırasıyla %55,24, %60,08, %61,07 ve %60,66 olarak hesaplamışlardır.

Nasef ve ark. [55], konsantre fotovoltaiik (CPV) güneş sisteminin termal regülasyonu için pasif ve aktif soğutma sistemlerinin bir entegrasyonunu modellemişlerdir. Faz değişim malzemesinin (PCM) ısı depolama pilini, geliştirilmiş tasarımda kapalı devre su soğutma sistemi ile birleştirmişlerdir ve sistem bileşenlerinin ve tüm sistemin termal ve elektriksel performanslarını analiz etmişlerdir. Su tankındaki PCM plakalarının farklı düzenlemelerinin sistem performansları üzerindeki etkilerini incelemek için daha fazla araştırma yapılmıştır. Isı transfer sıvısı (HTF) olarak nanofluid kullanılarak sistem performansının artırılması da değerlendirildi. Sonuçlar, önerilen sistemin geleneksel direkt PCM-PV ve su soğutmalı bireysel sistemlere kıyasla CPV ortalama sıcaklığında %60 azalma sağladığını göstermiştir. 10 konsantrasyon oranında (CR) ve 0,01 m/s HTF hızında, hücre sıcaklığı 78°C'yi aşmaz. Ayrıca, PCM maksimum sıcaklığı bozulma sıcaklığı sınırının altında tutulur. Su tankındaki PCM plakalarının düzenlemelerinin sistem performansı üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Nanoakışkanı HTF arttırıcı olarak kullanmak CPV verimliliğini %2,7 arttırır ve PV maksimum sıcaklığını ve PCM erime süresini sırasıyla 4 °C ve %12 azaltır.

Ghodbane ve ark. [56], damıtılmış suya (DW) dağıtılmış MWCNT eklenmesiyle oluşan nanoakışkanın fresnel güneş reflektörü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. MWCNT/DW nanoakışkanın stabilitesi ve termofiziksel özelliklerini değerlendirdiklerinde, 25°C'de nanoakışkanın ısı iletkenliği %0,05, %0,1 ve %0,3 hacim oranlarında sırasıyla %3, %6 ve %7 oranında artış göstermiştir. Ayrıca nanoakışkanın ısı iletkenliği sıcaklık artışı ile de artış (70°C'de %0,3 hacim oranı için %11) göstermiştir. Lineer güneş reflektörü içindeki nanoakışkanın geçici davranışını değerlendirmek için model oluşturmuşlardır ve incelenen güneş kollektörünün farklı bileşenlerindeki enerji dengesi denklemlerini çözmek için MATLAB yazılım programından yararlanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre 14:00'da maksimum %29,205 ısı verim elde etmişlerdir. %0,3 hacim oranına sahip MWCNT/DW nanoakışkan, en yüksek ısı verime (%33.81) ve en yüksek PEC değerinin yanı sıra en düşük entropi üretimi göstermiştir.

2.3. Nanoakışkan Kullanımlı Termoelektrik Jeneratör Sistemi Literatür Araştırması

TEJ'den elektrik enerjisinin elde edilmesi için gerekli olan sıcaklık gradyanını oluşturan ısı değiştiriciler, bu cihazların performansını etkileyen önemli etkenlerden biridir. Çalışmamızda ısı tansferini için önemli bir teknoloji olan nanoakışkanların tasarlanan TEJ verimine etkisi incelenmiştir. Daha önce farklı nanoakışkanlar ile incelenen bu sistem ile ilgili yapılmış olan birkaç çalışma literatürdeki yerini almıştır.

Li ve ark. [57], TEJ'in soğuk tarafının ısı transfer etkisinin iyileştirilmesinin, TEJ sistemlerinin performansını arttırmak için kullanılan yaklaşımlardan biri olduğunu ortaya koymuşlardır. Yaptıkları çalışmada, mini kanal bir ısı eşanjöründe soğutucu akışkan olarak grafen-su nanoakışkanını kullanmışlar ve TEJ'in performansını düşük sıcaklıklarda deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, mini kanallardan grafen-su nanoakışkanı geçirildiğinde daha iyi voltaj üretimi, çıkış gücü ve dönüşüm verimliliği elde etmişler ve sadece su kullanımına göre bu değerlerin sırasıyla %11,29, %21,55, %3,5 oranında artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Zhou ve ark. [58], yaptıkları çalışmada CuO-su nanoakışkanını kullanarak TEJ'in performansını analiz etmişlerdir. Sıcak ve soğuk akışkan olarak kullanılan CuO-su nanoakışkanın TEJ'in verimini makro ve mikro boyuttaki kanalları kullanarak araştırmışlardır. Mikro boyuttaki kanaldan su ve nanoakışkan geçirildiğinde voltaj ve çıkış gücünün sadece su kullandıklarında daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı şartlar altında mikro boyutlu kanal kullandıklarında çıkış gücünde su kullanımına kıyasla %38'lik artış elde etmişlerdir.

Karana ve ark. [59], otomotiv atık ısı geri kazanım sisteminde, TEJ için EG-su, ZnO ve MgO nanoakışkanlarını soğutma sıvısı olarak kullanmışlar ve performans değerlerini karşılaştırmışlardır. Egzoz giriş sıcaklığı, TEJ'in toplam alanı, Reynolds sayısı ve nanoakışkan partikül konsantrasyonu gibi parametrelerin sistemin güç çıkışı, dönüşüm verimliliği ve gerilimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre MgO-su başta olmak üzere kullanılan nanoakışkanların sistemin çıkış gücünü, voltajını ve dönüşüm verimliliğini arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Li ve ark. [60], TEJ verimliliğini arttırmak için mini kanalda soğutucu akışkan olarak grafen-su (G/W) kullanmış ve düşük sıcaklıklarda TEJ'in performansını incelemiştir. Sistemde nanoakışkan kullanımının su kullanımına göre %11,29 oranında daha iyi

voltaj üretimi, %21,55 daha iyi çıkış gücü ve %3,5 oranında daha iyi çıkış gücü elde etmişlerdir.

Xing ve ark. [61], TEJ'in soğuk tarafın ısı transfer kapasitesini geliştirmek için soğutucu olarak su bazlı grafen nanoakışkan kullanmışlardır. Sonuçlar, TEJ sisteminin sıcak tarafı, voltajı, çıkış gücü ve dönüşüm verimliliğinden emilen ısının, nanoakışkan soğutma sıvıları tarafından büyük ölçüde geliştiğini göstermiştir. Çıkış gücü ve soğutucu olarak kullanılan ağırlıkça %0,1 grafen nanoplatelet sulu nanoakışkan dönüşüm verimliliği, sırasıyla %26,39 ve %14,74 oranında artış göstermiştir.

Abd El-Samie ve ark. [62], yaptıkları çalışmada, zikzak mikro kanal ısı alıcılarında (ZMCHS) Al_2O_3 /su nanoakışkan akışları ile soğutulan bir TEJ'in performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmaları için ANSYS 15.0 sürümünde termal elektrik ve sıvı akış araçlarını birleştirmek için tek yönlü sıvı-yapı etkileşim (FSI) aracını kullanmışlardır. Çalışmalarında, ısı akısı ($2-50 \text{ kW/m}^2$), laminar akışta Reynolds sayısı ($5-1500$), giriş akış sıcaklığı ($293-303 \text{ K}$) ve nanoparçacık konsantrasyonunun (%6), TEJ modülünün elektrik potansiyeline, çıkış gücüne ve verimliliğe etkileri üzerine odaklanmışlardır. Sonuçlar, ısı akısındaki artışın çıkış gücünü ve TEJ verimliliğini arttırdığını göstermiştir. Daha yüksek Reynolds sayıları ($Re > 400$), giriş sıcaklığı ve nanoakışkan konsantrasyonu TEJ performansı üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olmuştur.

Soltani ve ark. [63], TEM ile entegre edilmiş bir fotovoltaik termal kolektörden oluşan hibrid fotovoltaik termal/termoelektrik sistemi, farklı soğutma yaklaşımı ile analiz etmişlerdir. Dikkate alınan soğutucu akışkanlar su, hava ve su bazlı SiO_2 ve Fe_3O_4 olmuştur. Soğutma sıvılarının giriş/çıkış sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve ünitenin yüzey sıcaklığı gibi farklı parametreleri deneysel testler sırasında ölçülmüşlerdir. Sonuçlara göre su bazlı SiO_2 nanoakışkan, 900 W/m^2 sabit ışınlamada maksimum enerji verimliliği sağlayan en iyi soğutucu olmuştur. Nanoakışkanlar kullanılarak ekserji verimliliğinin arttığı bulunmuştur. Su bazlı SiO_2 doğal soğutma yöntemine kıyasla güç ve verim üzerinde sırasıyla %54,29 ve %3,35 oranında iyileşme, su bazlı Fe_3O_4 soğutma güç üretimi ve verimliliğinde %52,40 ve %3,13 iyileşme göstermiştir.

Rajae ve ark. [64], yaptıkları çalışmada termal fotovoltaik hücreler (PV/T)-TEJ hibrit sistemi için yeni bir soğutucu olarak su bazlı Co_3O_4 nanoakışkanı kullanmışlar ve geliştirilmiş faz değişim malzemesinin (parafin mumu/alümina tozu) eşzamanlı

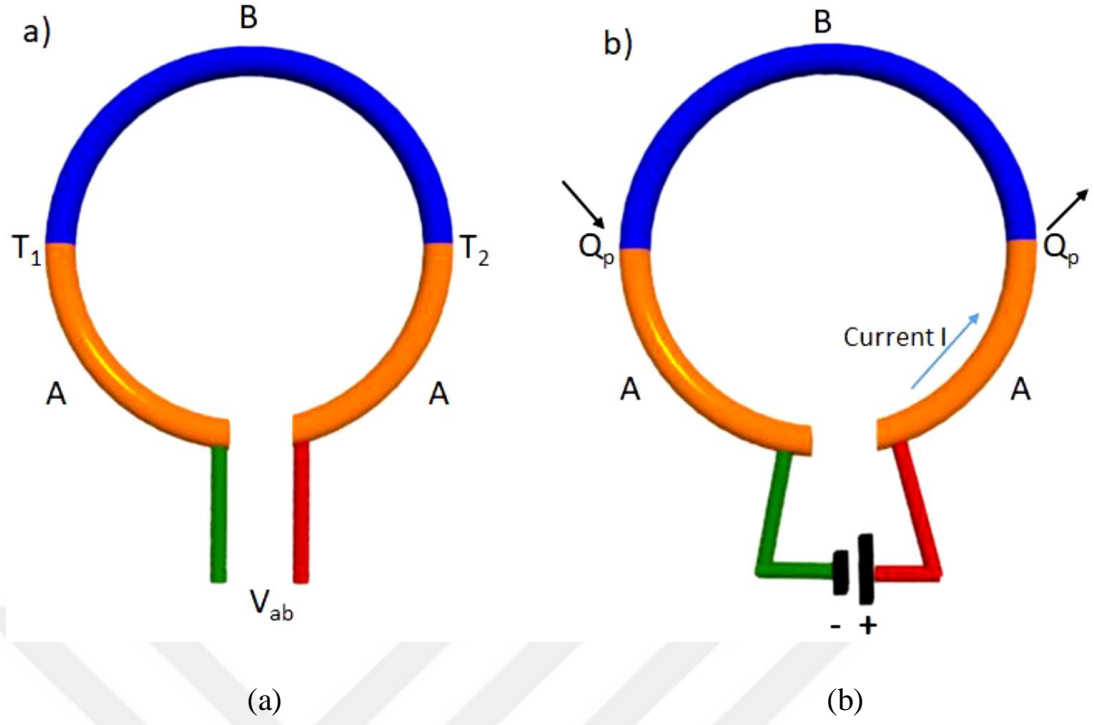
kullanımının etkinliğiyle deneysel bir çalışma yapmışlardır. Böyle bir sistemin toplam elektrik, termal ve ekserji verimliliği, su ve %0,25, %0.5 ve %1 hacim oranlarına sahip nanoakışkan dahil olmak üzere dalgıç çalışma sınırlarına sahip üniteler ile geliştirilmiş, PCM soğutma metoduna sahip %1 hacim oranlı nanoakışkan içeren ünite ile karşılaştırılmıştır. Bir soğutma yöntemi olarak geliştirilmiş PCM ile %1 hacim oranlı nanoakışkan kullanımının, su soğutma tekniğine kıyasla genel elektrik verimliliğini %12,28 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca su soğutma yöntemiyle PV/T-TEJ ile karşılaştırıldığında, PV/T-TEJ ekserji verimliliğinde %11,6'lık bir artış gözlemlenmiştir.



3. TERMOELEKTRİK

TE, bir sistemin elektriksel ve ısı özellikleri arasındaki etkileşimi içerir. Sıcaklık gradyanından kaynaklanan elektrik yükü akışını veya elektrik potansiyel farkından kaynaklanan ısı akışını TE etkilerle ifade eden olgudur. TE, enerjinin ısı ve elektrik arasındaki doğrudan dönüşümünü karakterize eder ve üç ana etkiden oluşmaktadır. Bunlar Seebeck, Peltier ve Thomson etkisidir. İlk TE etki olan Seebeck etkisi, 1821 yılında Alman fizikçi olan Thomas Johann Seebeck tarafından keşfedildi. Seebeck, birbirine bağlı iki farklı metalden oluşan düzeneğin bağlı uçlarından birini ısıtmış ve bu ısının etkisiyle farklı sıcaklıklara sahip olan metallerin pusula mıknatısını saptırdığını gözlemlemiştir [65]. Başlangıçta bu durumun sıcaklık farkından kaynaklanan manyetizma olduğuna inanılmış daha sonra amper yasasına göre indüklenen bir elektrik akımının mıknatısı saptırdığı keşfedilmiştir [66]. Daha sonra 1834 yılında Peltier etkisine adını veren Charles Peltier, birbirine bağlı iki benzer malzemeden bir elektrik akımı geçirildiğinde bağlantı noktasının bir ucunda ısının üretilebileceğini diğer ucunda da ısının çıkarılabileceğini keşfetmiştir. Seebeck ve Peltier tarafından gerçekleştirilen keşifler ile ısı enerjisinin elektrik enerjisine veya elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşebileceği anlaşılmıştır. 1856 yılında William Thomson, Seebeck ve Peltier etkisi arasındaki termodinamiksel ilişkinin keşfedilmesini sağlamıştır. Bir iletkende hem sıcaklık gradyanı hem de elektrik akımı akışı olduğunda çevreyle bir ısı alışverişi olduğunu keşfetti. Bu ilişkiler Kelvin ilişkileri olarak bilinir.

TE etkiler, ısı gradyanlarının neden olduğu elektriksel büyüklükleri (elektrik potansiyeli ve akım) ölçebilmeyi sağlamaktadır. Bu büyüklüklerin ölçülmesi son derece güç olsa da, elektrik gerilimi ve akım, ısı akışını indükler ve elektrik ile indüklenen ısı akışı sıcaklık gradyanını oluşturur. Seebeck etkisi, sıcaklık gradyanının meydana getirdiği akım akışının nasıl oluşturabileceğini açıklarken, Peltier etkisi, elektrik akımının nasıl bir ısı akışı oluşturabileceğini açıklar. Seebeck ve Peltier etkisinin enerji dönüşümünü gerçekleştiren çalışma mekanizması (Şekil 3.1) TE cihazların temelini oluşturur. TE cihazların soğutucu veya jeneratör olarak tasarlanması bu etkiler baz alınarak gerçekleşir.



Şekil 3.1. Termoelektrik etkilerin çalışma prensibi (a) Seebeck, (b) Peltier [67]

TE etkilerin keşfiyle gerçekleşen teknoloji yarıiletken malzemenin keşfine kadar yavaş bir ilerleme göstermiştir. 1930'lu yıllarda keşfedilen yarıiletken malzemenin daha sonra TE sistemlere uygulanmasıyla bu alanda gelişmeler yaşanmıştır. TE etkiler ve yarıiletken malzeme TE cihazların temelini oluşturmuştur.

TE cihazlar, ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünü ya da elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümünü sağlar. Cihazların enerji dönüşümü termodinamiksel olarak tersinir olan TE etkilere ve tersinmez etki olan Joule etkisine dayanmaktadır. TE cihazların enerji dönüşümleri için seçilen malzemeler cihazın performansını belirleyen önemli bir parametredir. Bu bölüm, TE cihazları ve bu cihazların çalışma prensipleri olan Seebeck, Peltier ve Thomson etkilerini ve termodinamiksel süreçleri ayrıca cihazları oluşturan malzeme özelliklerini kapsamaktadır.

3.1. Seebeck Etkisi

Seebeck etkisi, ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşebileceğini ifade eden olgudur. Bu etki, TEJ'in temelini oluşturur. Farklı sıcaklıklarda tutulan, iki farklı malzemeden oluşan bir sistemde akım oluşabileceğini ve bu akımı sürmek için voltaj üretilebileceğini göstermiştir. Bir yarıiletken malzeme boyunca sıcaklık gradyanı

uygulandığında daha fazla kinetik enerjiye, hıza sahip olan malzemenin sıcak tarafındaki yük taşıyıcıların soğuk tarafına difüzyonuna neden olur. Sonuç olarak, malzeme boyunca karşıt Seebeck gerilimleri oluşur. Sıcaklık farkıyla oluşan Seebeck elektromotor kuvveti denklem 3.1 ile elde edilebilir [68].

$$E_{emf} = -\alpha \Delta T \quad 3.1$$

α Seebeck katsayısı, ΔT sıcaklık farkını ifade eder. Elektron yoğunluğunun yüksek olduğu n tipi malzemede negatif Seebeck voltajı ve delik yoğunluğunun yüksek olduğu malzemede pozitif Seebeck voltajı meydana gelir. Malzemenin maruz kaldığı sıcaklık farkı ve bu sıcaklık farkıyla oluşan elektrokimyasal potansiyel (V) fark arasındaki oransallık Seebeck katsayısı olarak adlandırılır (Denklem 3.2).

$$\alpha = - \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad 3.2$$

Seebeck etkisini her malzeme gerçekleştirebilir ancak geleneksel metal veya metal alaşımlarında üretilen voltaj oldukça küçük miktarlardadır. Seebeck enerji dönüşümünü gerçekleştirilmesini sağlayan en iyi malzeme yarıiletkenlerdir.

3.2. Peltier Etkisi

Peltier etkisi, elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşebileceğini ifade eden olgudur. Bu etki, TES'lerin temelini oluşturur. Peltier etkisi, Seebeck etkisinin tersi bir prensibe sahiptir ve elektrik gücünün doğrudan sıcaklık farkına dönüşebileceğini ifade eder. Peltier etkisi, prensip olarak Joule ısıtma etkisine benzemektedir ancak Joule ısıtmasında akım sadece içinde aktığı malzemede sıcaklığı arttırmaktadır [69]. Peltier etkisinde ise akımdan kaynaklı bir sıcaklık farkı yaratılır ve malzemenin bağlantı noktalarından biri ısıyı emerken, diğer tarafı ısıyı serbest bırakır.

Isı akışının yönünü belirleyen çoğunluk yük taşıyıcılarıdır. Yük tarafından taşınan enerji, temas malzemelerinin Fermi seviyelerine bağlıdır [70, 71]. Elektronlar bir malzemeden farklı bir Fermi enerji seviyesine sahip başka bir malzemeye geçtiğinde, enerjiyi emmeleri veya salıvermeleri gerekir. Emilen veya serbest bırakılan enerji, iki Fermi enerjisi arasındaki farktır ve kendisini ısı şeklinde gösterir. Peltier katsayısı (Π) Q_{pel} , ısı akımı ve I elektrik akımı arasındaki ilişki olarak tanımlanabilir (Denklem 3.3).

$$\Pi = \frac{Q_{pel}}{I} \quad 3.3$$

Q_{pel} , ısınn emildiği bağlantı noktasında pozitif, ısınn serbest bırakıldığı noktada negatif değere sahiptir. Peltier etkisinde akım yönü ters çevrilirse, ısı açığa çıkma ve soğurma yerleri de tersine döndürülebilir.

3.3. Thomson Etkisi

Thomson etkisi, Seebeck ve Peltier etkisi arasındaki bağlantıyı verir. Bu etki, aynı anda akım geçen ve sıcaklık gradyanına maruz kalan homojen bir malzeme içinde ısınn geri dönüşümlü bir şekilde emilmesi veya serbest bırakılması olduğunu belirtir. Bir sıcaklık gradyanının varlığında, n-tipi yarı iletkenler yüksek potansiyelde daha sıcak bir uca ve düşük potansiyelde daha soğuk bir uca sahiptir [72]. Akımın yönü sıcak uçtan soğuk uca, yüksek potansiyelden düşük potansiyele doğru olduğunda ısı oluşur. Bu duruma pozitif Thomson etkisi denir. Ters durumda p-tipi yarı iletkenler yüksek potansiyelde daha soğuk bir uca ve düşük potansiyelde daha sıcak bir uca sahiptir. Akımın yönü sıcak uçtan soğuk uca, düşük potansiyelden yüksek potansiyele doğru olduğunda ısı absorbe edilir. Bu duruma negatif Thomson etkisi denir.

Thomson etkisi, TE materyali içinde aktif olan Peltier etkisinin sürekli bir varyantı olarak görülebilirken Peltier etkisi sadece farklı malzemeler arasındaki arayüzlerde ortaya çıkar. Thomson etkisi genellikle termoelektrik cihazların analizinden hariç tutulur, çünkü Seebeck, Peltier etkilerine ve Joule ısıtmasına göre daha küçük bir değere sahiptir [73]. Thomson katsayısı (β), emilen veya serbest kalan ısı (Q_{thm}), sıcaklık farkı (ΔT) ve geçen akım (I) ile ifade edilebilir (Denklem 3.4). Peltier ve Seebeck katsayıları sadece malzeme çiftleri için belirlenebilirken, Thomson katsayısı tek tek malzemeler için doğrudan ölçülebilirdir.

$$\beta = \frac{Q_{thm}}{I \Delta T} \quad 3.4$$

3.4. Joule Etkisi

Akım bir malzemedan geçtiğinde, elektrik enerjisinin bir kısmı kaybolur ve kaybolan bu enerji ısı enerjisine dönüşür. Bu durum geri dönüşü olmayan Joule ısıtma etkisiyle açıklanır. Joule etkisi, dirençli bir sistemden geçen akım akışının belirli bir miktarda ısı üretebileceğini açıklamaktadır. Thomson etkisinden farklı olarak, Joule

etkisine bağılı ısı, akımın yönüne ve sıcaklık eğiminin varlığına bakılmaksızın her zaman bir iletken içinde emilir. Joule ısısının miktarı sistemden geçen akım miktarına ve sistemin direncine bağılıdır. Joule etkisiyle üretilen ısı miktarı (Q_{joule}) denklem 3.5 ile gösterildiği gibidir.

$$Q_{\text{joule}} = I^2 R \quad 3.5$$

Joule etkisi, saf bir termoelektrik etki değildir, ancak tüm malzemelerde bulunur ve hem termoelektrik jeneratörlerde hem de Peltier soğutucularda performansı düşüren önemli ve istenmeyen bir etkidir [74].

3.5. Kelvin İlişkileri

Kelvin ilişkileri Seebeck, Peltier ve Thomson etkileri arasındaki bağlantıları tanımlar [75]. Peltier katsayısı Seebeck katsayısı ile aşağıdaki ilişki ile ifade edilir:

$$\Pi = \alpha \cdot T \quad 3.6$$

Bu ilişki deneysel olarak doğrulanır bu nedenle geri döndürülebilirlik varsayımı geçerli görünmektedir ve Peltier Etkisine bağılı ısı akışının hesaplanmasını sağlar.

$$Q_{\text{pel}} = \alpha IT \quad 3.7$$

Thomson katsayısı Seebeck katsayısı ile aşağıdaki ilişki ile ifade edilir:

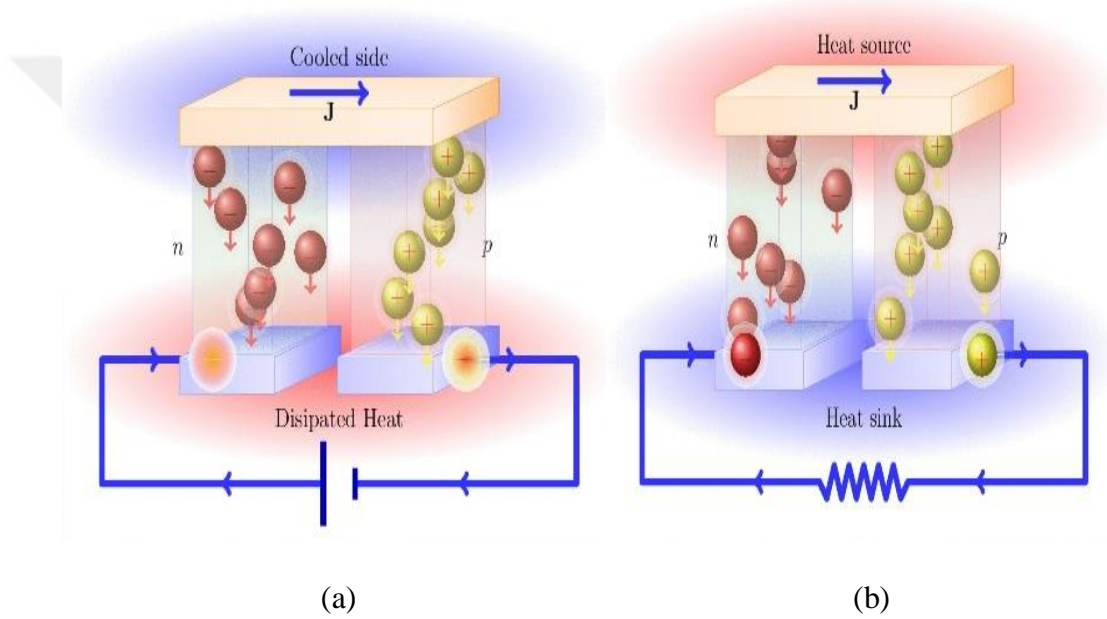
$$\beta = T_{\text{avg}} \frac{d\alpha}{dT} \quad 3.8$$

T_{avg} , malzemenin ortalama sıcaklığıdır.

3.6. Termoelektrik Cihazlar

TE cihazlar, TE etkilere ve termodinamik kanunlara bağılı olarak enerji dönüşümü gerçekleştiren sistemlerdir. TE cihazlar, Seebeck veya Peltier etkisine göre çalışırlar. Dayandıkları etki prensibine göre güç üretimi veya soğutucu görevi görürler. Seebeck etki prensibiyle çalışan TEJ'ler, ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünü, Peltier etki prensibiyle çalışan TES'ler ise elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümünü sağlar. Her ne kadar TE cihazların çalışması Seebeck ve Peltier etki prensibine dayansa da enerji dönüşümü gerçekleştirilirken tüm TE etkiler gerçekleşir.

TE cihazlar temel olarak TEM'den oluşurlar. Bu modüller sıcaklık gradyanı uygulandığında voltaj üretirler ya da voltaj uygulanarak sıcaklık gradyanı oluştururlar. Yarıiletken malzemenin keşfine kadar tercih edilmeyen bu cihazlar yarıiletken malzemenin gelişimiyle önem kazanmıştır. Bunun nedeni TE cihazların temelini oluşturan TEM'lerin, yarıiletken malzeme kullanımıyla birlikte daha iyi verim değerlerinin elde edilmesidir. Şekil 3.2 TES ve TEJ tekli modülünü göstermektedir. Bileşen olarak hemen hemen aynı malzemedan oluşan bu cihazlar çalışma prensibinden kaynaklanan farklılıktan dolayı, TES için devre voltajı ya da TEJ için direnç bağlanmasıyla değişiklik gösterir.



Şekil 3.2. Termoelektrik cihazları oluşturan modüller (a) TES, (b) TEJ [76, 77]

TES, devredeki akımın uygulanmasında ısıyı bir kavşaktan diğerine pompaladıkları için ısı pompalarına benzer şekilde çalışır. Isı salınımı veya emilimi, iki malzemenin birleşiminden geçen yük taşıyıcıların kinetik enerjisindeki değişiklik ile açıklanabilir. Bir TEM'e düşük voltajlı bir DC güç kaynağı uygulandığında, ısı TEM'in bir ucundan diğer ucuna doğru hareket eder. TEM'e bağlanan doğru akım kaynağı, elektronların yarı iletken malzemelerden geçmesini sağlar. Taşıma elektronları, düşük enerji seviyeli malzemedan yüksek enerji seviyeli malzemeye geçer. Modülün soğuk bağlantı noktasında (T_c) taşıma elektronlarının hareketi sayesinde ısı absorbe edilir ve absorbe edilen ısı sıcak bağlantı noktasına (T_h) taşınır. Soğuk bağlantı noktasının sıcaklığı (T_c) azalır ve ısı, ortamdan soğuk bağlantı

noktasına daha düşük bir sıcaklıkta aktarılır [78, 79]. Böylece TES modüllerinin bir yüzeyi soğurken diğer yüzeyi de ısınmaya başlar. Uygulanan DC voltajının polaritesindeki (artı ve eksi) bir değişiklik ısının ters yönde hareket etmesine neden olup bu olgunun tersine çevrilebilir. Bu nedenle, TES'ler elektrik enerjisi sağlayarak soğutma veya ısıtma için kullanılabilir. Sıcak uçta dağıtılan net ısı, soğuk uçta emilen net ısı artı uygulanan elektrik gücünün toplamıdır. Soğutma verimliliğini tanımlamak için kullanılan performans katsayısı (COP), soğuk uçta emilen net ısının uygulanan elektrik gücüne bölünmesiyle tanımlanır. TES'in performansı, uygulanan elektrik akımına, sıcak ve soğuk yüzeylerin sıcaklığına, soğuk yüzey ile cihaz yüzeyi arasındaki elektrik temas direncine, malzemenin ısı ve elektrik iletkenliğine, ısı alıcısının cihazın sıcak tarafındaki termal direncine bağlıdır.

TEJ'ler, sıcaklık farkını ve ısı akışını DC güç kaynağına dönüştüren cihazlardır. TEM'e sıcaklık gradyanı uygulandığında yük taşıyıcılar sıcak taraftan soğuk tarafa doğru hareket ederler [80]. Bu difüzyon bir tarafta yük taşıyıcıların birikmesine yol açarak Seebeck voltajının üretilmesini sağlar. TEM'e harici bir yük bağlanmasıyla üretilen voltaj, elektrik akımını sürerek harici yükte güç oluşumunu sağlar.

TE cihazlar, sabit durumlu cihazlardır, hareketli parçaları yoktur ve kurulumları kolaydır [81]. Bu cihazlar uzun ömürlüdür. Sessiz çalışırlar ve fazla bakım onarım gerektirmezler bu yüzden birçok alanda kullanılmaktadırlar. TEJ çoğunlukla çok fazla sıcaklık farkının ve enerjinin boşa harcandığı yerlerde kullanılırken, TES düşük sıcaklık farkının olduğu ve soğutmanın gerekli olduğu ortamlarda kullanılır [82]. Günümüzde kullanılan TES'ler, soğutma sisteminin tasarım kriterlerinin yüksek güvenilirliği, fazla ağırlık gerektirmeyen sistemler, sıcaklık kontrollü uygulamalar, küçük boyutların geçerli olduğu ortamlar ve tehlikeli elektrik ortamlarında kendinden güvenilirlik gibi faktörlerin etkisindeki uygulamalarda kullanılır. Yüksek enerji verimliliğinin dezavantaj oluşturmadığı uzay sistemleri, tıbbi ve bilimsel ekipmanlar veya portatif buzdolabı gibi alanlarda TES kullanılmaktadır.

TEJ, önce ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ve daha sonra bu mekanik enerjiyi bir alternatör kullanarak elektriğe dönüştüren birçok ısı motorunun aksine doğrudan enerji dönüşümü gerçekleştirir [83]. Bu cihazlar, otomotiv endüstrisi, uzay teknolojileri, güneş enerjisi ve jeotermal enerji sistemleri gibi birçok alanda

kullanılmaktadır. TE cihazlar, birçok avantaja ve uygulama alanına sahip olmasına rağmen bu cihazların kullanımı yaygınlaşamamıştır. Bunun nedeni, bu cihazların yüksek maliyetli olması, teknolojilerindeki yavaş gelişmeler ve en önemlisi TE malzemelerin büyük bir etken olduğu dönüşüm verimliliğin, bu malzemelerin sınırlandırdığı düşük ZT değerinde olmasıdır.

3.7. Figure of Merit

Soğutma veya güç üretimi için bir TE malzemenin kalitesini belirleyen faktör 1900'lerin başında E. Altenkirch'in öne sürdüğü figure of merit (Z) değeridir. Z, bir malzemenin enerji dönüşüm verimliliğini tanımlamak için Seebeck katsayısını diğer önemli fiziksel parametrelerle birleştiren boyutsuz bir sayıdır [84]. Bu değer malzemenin elektrik iletkenliği ($\sigma = 1/\gamma$), Seebeck katsayısı (α) ve ısı iletkenliği (k) kullanılarak hesaplanır (Denklem 3.9).

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} \quad 3.9$$

TE sistemlerde kullanılan malzemenin Z değerlerinin yüksek olması beklenir dolayısıyla bu durumu sağlamak için güç faktörü ($\alpha^2 \sigma$) değeri yüksek olmalıdır [85]. İyi termoelektrik malzemelerin Joule ısıtmasını en aza indirmek için düşük elektrik direncine (γ), büyük bir sıcaklık gradyanını korumak için düşük termal iletkenliğe ve ısının elektrik gücüne veya elektrik gücünün soğutma performansına maksimum dönüşümü için yüksek Seebeck katsayılarına sahip olması gerekir. Z değeri, ısının elektriğe dönüştürülmesi sırasında bir termoelektrik malzemenin verimliliğinin bilinmesini sağlar ve bu faktör ne kadar yüksek olursa, malzeme o kadar verimli olur. Malzemelerin sıcaklığa bağlı özellikleri figure of merit değerini de etkilemektedir. Sıcaklığa bağlı figure of merit (ZT) değeri denklem 3.10 ile ifade edilir.

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} T \quad 3.10$$

3.7.1. Termoelektrik Malzeme

TE sistemler için önemli bir parametre olan ZT değerini etkileyen malzeme özellikleri birbiriyle ilişkilidir ve birinin optimize edilmesi diğerleri üzerinde olumsuz etkiye neden olabilir çünkü bu parametreler yük taşıyıcı konsantrasyonu, bant yapısı,

Fermi enerjisi gibi birçok faktörün bir fonksiyonu olarak birbirine bağlıdır. ZT değerini belirleyen özellikler, yük taşıyıcıların (elektron ve fonon) yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Elektronlar ve fononlar (kafes titreşimleri) malzemelerin ısı iletkenliğini etkiler [86]. Taşıyıcı konsantrasyonu arttıkça, Seebeck katsayısı ve elektriksel direnç azalırken, ısı iletkenlik artar. Buna bağlı olarak elektrik iletkenliği, elektriksel direncin tersi bir fonksiyon olduğu için artış gösterir. Wiedemann - Franz Yasası'na göre elektrik iletkenliği, ısı iletkenlik ve Seebeck katsayısı olan üç parametrenin güçlü korelasyonu nedeniyle TE sistemlerin verimliliği hala istenilen düzeye ulaşamamıştır. Taşıyıcı konsantrasyonu ile Seebeck katsayısı, elektriksel iletkenlik ve ısı iletkenlik arasındaki ilişki aşağıdaki denklemlerle ifade edilir [87-89]. Seebeck katsayısı ile taşıyıcı konsantrasyonu arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir:

$$\alpha = \frac{8\pi^2 k_B^2}{3eh^2} m^* T \left(\frac{\pi}{3n} \right)^{2/3} \quad 3.11$$

k_B , Boltzmann sabiti, e , taşıyıcı yükü, h , Planck sabiti, m^* , yük taşıyıcısının etkili kütlesi ve n , taşıyıcı konsantrasyonudur. Denklem 3.11, daha düşük bir taşıyıcı konsantrasyonu ile daha büyük bir Seebeck katsayısı olacağını gösterir. Elektriksel iletkenlik ve taşıyıcı konsantrasyonu arasındaki ilişki şu şekilde tanımlanabilir:

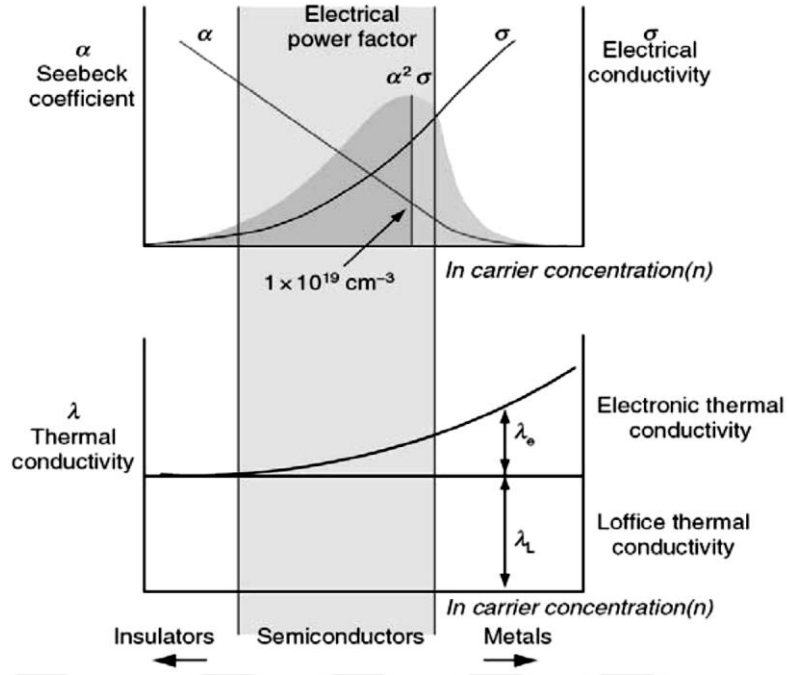
$$\sigma = n.e.\varepsilon \quad 3.12$$

ε taşıyıcı hareketliliğidir. Denklem 3.12 daha düşük bir taşıyıcı konsantrasyonun, daha düşük bir elektrik iletkenliğine neden olacağını belirtmektedir. Daha yüksek etkili bir kütle Seebeck katsayısının artmasına neden olur. Bununla birlikte, ağır taşıyıcılar nispeten daha yavaş hareket edecek ve daha küçük hareketlilik anlamına gelecektir. Böylece daha küçük bir hareketlilik daha küçük bir elektrik iletkenliğine neden olur. Seebeck katsayısı ile elektriksel iletkenlik arasındaki ilişki, bu ikisinin aynı anda optimize edilmesini zorlaştırır. Wiedemann Franz yasası, metallerde ve dar bant aralıklı yarı iletkenlerde termal iletkenliğin elektronik katkısını tanımlar. Wiedemann-Franz yasasına göre, elektriksel iletkenlik ile elektriksel ısı iletkenlik arasındaki ilişki şöyle tanımlanır:

$$k_L = \sigma.L.T \quad 3.13$$

L, Lorenz sayısını ifade eder. Denklem 3.13'de ısı iletkenliğin elektronik bileşenin elektrik iletkenliği ile doğru orantılı olduğu görülebilir ve az miktardaki taşıyıcı konsantrasyonu ile ısı iletkenlik daha az olacaktır.

TE sistemler için malzemenin güç faktörünün yüksek olması istenilen şarttır. Ancak güç faktörünü etkileyen parametrelerin istenilen şartlara sağlanması oldukça zordur. İyi bir termal ve elektrik iletkenliğine sahip olan iletken malzemeler düşük Seebeck katsayısına sahiptir [90]. Yalıtkan malzemeler yüksek Seebeck katsayısı ve düşük ısı iletkenliğe sahiptir ancak elektrik iletkenliğinin de düşük olmasıyla istenilen şartları sağlayamamaktadır. Yarıiletken malzemeler iletken ve yalıtkan malzemelere göre daha yüksek ZT değerine sahip olmalarıyla TE sistemlerin tasarımında öne çıkmaktadır. Katı hal malzemeleriyle ilgili yapılan çalışmalar bazı yarı iletkenlerin yüksek güç faktörüne, düşük ısı iletkenliğe sahip olmalarıyla ZT değerlerinin yüksek olduğunu ve bu durumun TE sistemlerde yarıiletkenlerin en iyi alternatiflerden biri olduğunu destekler. ZT parametresini etkileyen yük taşıyıcı konsantrasyonu artışının elektrik iletkenliğini arttırdığını ve Seebeck katsayısını azalttığı göz önüne alındığında ideal taşıyıcı konsantrasyonlarıyla sadece yarıiletken malzemelerde ulaşılan 10^{19} - 10^{20} cm^{-3} aralığında optimum güç faktörü bu malzemeleri diğer malzemelerden üstün kılar. Yarıiletken malzemeler ulaştıkları bu değer ile TE sistemlerinin verimliliğini en üst düzeye çıkaracak Seebeck katsayısı, elektrik iletkenliği ve ısı iletkenlik arasındaki en iyi uzlaşmayı sağlar. Şekil 3.3 elektriksel iletkenlik, Seebeck katsayısı, güç faktörü ve termal iletkenliğin serbest taşıyıcıların konsantrasyonuna bağımlılığını verir.



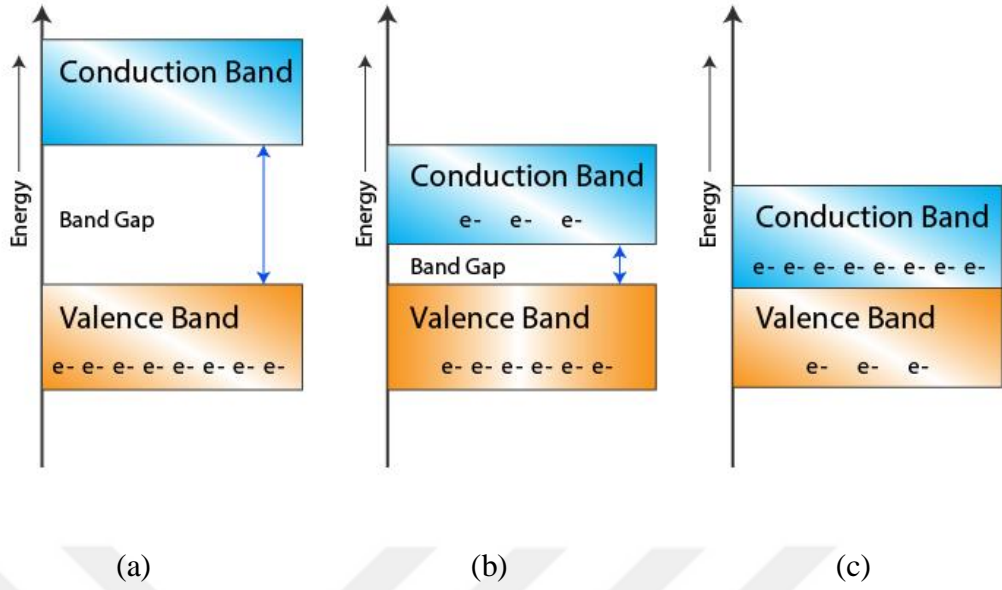
Şekil 3.3. Figure of merit değerini etkileyen parametrelerin yük taşıyıcı konsantrasyonuna bağlılığı [91]

Şekil 3.3 elektrik iletkenliğinin artan taşıyıcı konsantrasyonu ile arttığını, aynı zamanda Seebeck katsayısının azaldığını ve en yüksek güç faktörüne yarıiletken malzemelerin sahip olduğunu göstermiştir. Bu doğrultuda incelenen metal kalkojenitler termoelektrik sistemler için en uygun malzeme sınıfı haline gelmiştir. Bu bileşikler bir veya daha fazla kalkojen atomu (S, Se, Te) içerir ve metal oksitlerden daha az iyoniktirler dolayısıyla termoelektrik sistemler için uygun olan daha küçük bant boşlukları sağlar özellikle p-blok metal (Bi, Pb, Sn, vb.) kalkojenitleri güç üretimi ve soğutma için en çok çalışan sistemlerdir [92].

Günümüzde TE sistemler için bizmut tellür (Bi_2Te_3), kurşun tellür (PbTe), silikon germanyum (SiGe) malzemeleri ve bu malzemelerin alaşımları, CoSb_3 gibi skutteruditler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, çok çeşitli sıcaklıklardaki uygulamalar için ayarlanabilen, kendiliğinden düşük ısı iletkenliğe ve elektronik özelliklere sahiptir. Bahsedilen malzemelerin en yüksek ZT değerine ulaştığı sıcaklık aralığı farklıdır bu yüzden TE sistemler için malzeme seçimi, bu malzemelerin çalışma sıcaklığı rejimlerine bağlıdır [93]. Örneğin Bi_2Te_3 ve alaşımları düşük sıcaklıkta çalışır ve soğutma ve güç üretimi sistemleri için en iyi malzeme özelliklerini gösterir. Bi_2Te_3 ve alaşımları en iyi TE malzeme sınıfıdır. Bunun nedeni yapılan birçok araştırmaya rağmen oda sıcaklığında en yüksek verime sahip malzeme

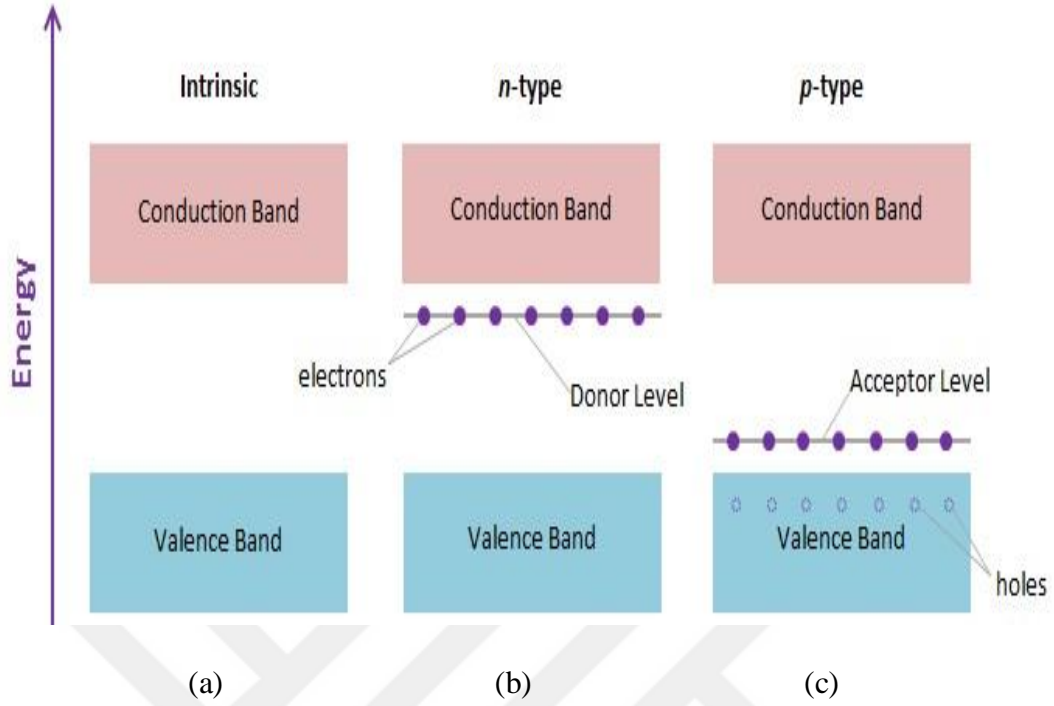
sınıfı olmasıdır. Bi_2Te_3 , düşük kafes ısı iletkenliği ve elektronik bant yapısı ile mükemmel termoelektrik özellikler gösterir. Bi_2Te_3 dolaylı bant boşluğuna yaklaşık 0,15 eV sahiptir. Bi atomları ve Te atomları, her katmanda güçlü iyonik-kovalent bağlarla bağlanırken, zayıf van der Waals komşu Te katmanları arasında bağlanır. Katkılı PbTe 350 K-700 K orta sıcaklık aralığında çalışır ve güç üretimi için oldukça etkili bir malzemedir. Malzeme, büyük atomik ağırlığından dolayı düşük bir ısı iletkenliği ve oda sıcaklığında 0,29 eV ila 450 °C'de yaklaşık 0,39 eV enerji bant aralığından kaynaklanan 10^{19} cm^{-3} mertebesinde optimum taşıyıcı konsantrasyonu sağlar. Si ve Ge, yüksek ısı iletkenliği nedeniyle oda sıcaklığında zayıf termoelektrik malzemelerdir ancak 1200 K civarı yüksek sıcaklıklarda çalışabilen nadir bir malzeme sınıfıdır ve derin uzay araştırmalarında kullanılır.

Malzemelerin hem Seebeck katsayısı hem de elektriksel dirençleri, iletim bandı (n tipi), değerlik bandı (p tipi) ve Fermi seviyesindeki farklılıkla ilgilidir. İletken, yarıiletken veya yalıtkan malzeme kristalin içinde yer alan her elektronun farklı bir konumu vardır ve bu farklılık elektronların farklı bir enerji seviyesinde olmasına neden olur [94]. Farklı enerji seviyelerinden kaynaklanan varyasyon enerji bantları denilen yapıyı oluşturur. Bu enerji bandı değerlik elektronlarını içerdiğinde değerlik bandını oluşturur ve değerlik bandının üzerinde yer alan bir diğer enerji bandına iletim bandı denir. Elektrik iletimi, bir banttaki elektronların bir enerji durumundan diğerine geçebilmesiyle mümkündür buna bağlı olarak boş bir bantta elektron olmaması ve tamamen dolu bir bantta elektronlar için serbest olmaması, elektrik iletimini ancak kısmen tamamen enerji durumların kısmen dolu olduğu elektronlarda bağlı kılar [95]. İletim bandının kısmen dolu ve değerlik bandının kısmen boş olması durumunda veya iletim bandı ile değerlik bandı üst üste bulunduğu malzeme iletkenidir. İletim bandı ile değerlik bandı arasında çok büyük bir boşluğun bulunması ve iletim bandında hiçbir elektronun bulunmaması durumunda, elektrik iletimi gerçekleşmeyeceği için malzeme yalıtandır. Yarıiletkenlerde, değerlik bandı tamamen dolu, iletim bandı ise tamamen veya kısmen boştur ve iletim bandı ile değerlik bandı arasında küçük bir bant boşluğu mevcuttur. Küçük bant boşluğu, oda sıcaklığında değerlik bandında bulunan bazı elektronların enerji boşluğunu geçmesi ve iletim bandına gidebilmesi için gerekli enerjii elde etmesini sağlar. Sıcaklık arttıkça, bazı yarıiletken malzemelerde enerji boşluğu azalır ve çok sayıda serbest elektronun hareketi sağlanır. Şekil 3.4 iletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin enerji bant diyagramlarını vermektedir.



Şekil 3.4. Malzemelerin enerji bant diyagramları (a) yalıtkan (b) yarıiletken (c) iletken [96]

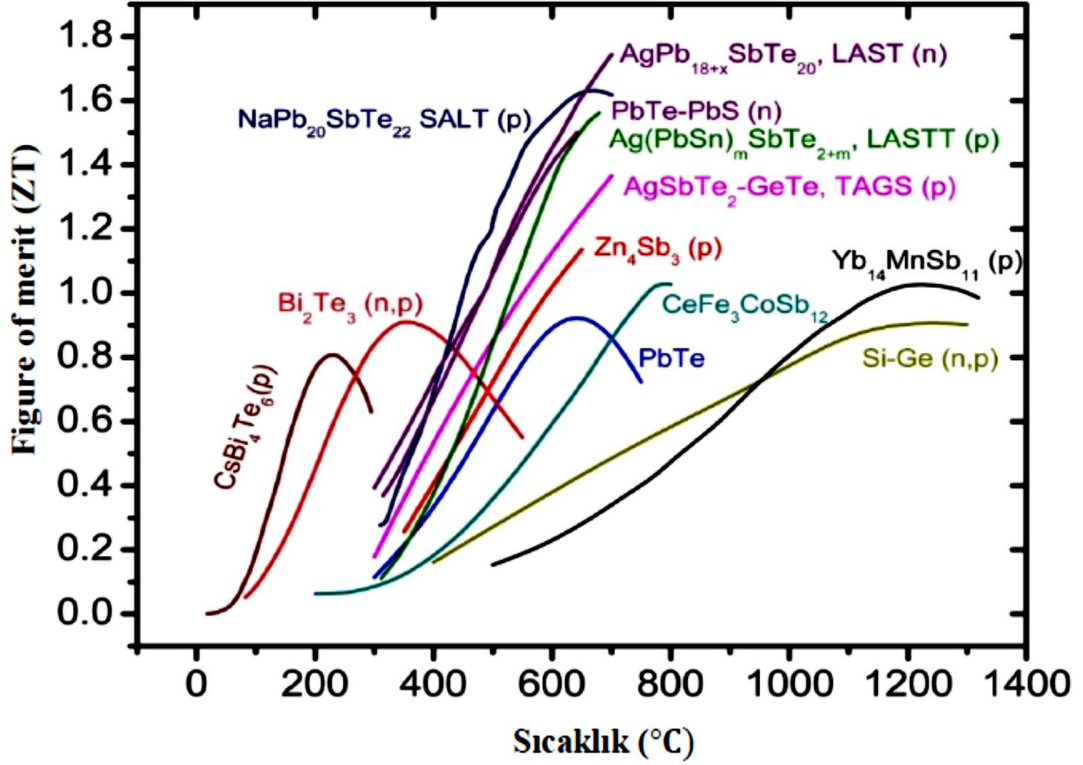
Yarıiletken malzemeler, doping (katkı), fiziksel yapı ve kompozisyona uygulanabilir olmasıyla diğer malzemelere üstünlük kurmaktadır. İletken malzemelerde elektron, yalıtkan ve yarıiletken malzemelerde genellikle fonon konsantrasyonu yüksektir. Doping, özelliklerini değiştirmek için içsel yarı iletkenlere safsızlıklar ekleme işlemidir ve yarıiletken malzemelerde, elektrik iletkenlikleri ve taşıyıcı tipi, doping tipi ve doping konsantrasyonu değiştirilerek, diğer özelliklere minimum etki ile kolayca değiştirilebilir. Uygulanan işlem sonrası yüksek oranda katkılanmış olan yarıiletkenler, tek tip bir taşıyıcıya, p tipi pozitif yük iletkeni (deliklere) veya n tipi negatif yük iletkenine (elektronlara) dönüştürülebilirler [97]. Yarıiletken malzemeler içsel ve dışsal olmak üzere iki gruba ayrılır. İçsel yarıiletken, herhangi bir önemli katkı maddesi türü bulunmayan saf bir yarı iletkenidir. Saf yarıiletkenin doping işlemi ile safsızlıklara maruz kalmasıyla dışsal yarıiletken (p ve n tipi) oluşur. Şekil 3.5’de saf yarıiletken ve doping işlemi ile oluşturulan p ve n tipi yarıiletken malzeme gösterilmiştir. Yarıiletkeni p olan çoğunluk yük taşıyıcıları deliklerdir ve p tipi yarıiletkenlerde katkı atomları kendileri için elektron aldıkları için alıcı görevi görürler ve n tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcı elektronlardır ve n tipi yarıiletkenlerde katkı atomlarına donör denir çünkü iletim bandına elektron vermekle görevlidir.



Şekil 3.5. Yarıiletken malzemelerin enerji bant diyagramları (a) içsel yarıiletken (b) n tipi yarıiletken (c) p tipi yarıiletken [98]

Fermi seviyesini kontrol ederek güç faktörünün optimize edildiği bir doping seviyesi bulmak önemlidir. Isıl iletkenliği azaltmak için ortak yaklaşım, kristal yapıya ek kısa menzilli bozukluk getirmektir. Öte yandan, bozulma kaçınılmaz olarak yük iletimini engeller, bu da elektrik iletkenliğini azaltabilir [99]. 1990'lardan beri skutterudit malzemeler de termoelektrik sistemlerde büyük ilgi görmeye başlamıştır. Skutteruditler, sergilediği çok çeşitli ilginç elektronik ve manyetik olgular ve umut verici termoelektrik özellikleri nedeniyle termoelektrik cihaz üretimine alternatif oluşturmuştur. Skutterudit, doğada var olan bir mineral - kobalt arsenittir (CoAs_3) ve 600-800 K sıcaklık rejiminde, ağır katkılı kurşun kalkojenitler (PbTe , PbSe , PbS) termoelektrik enerji üretimi için önde gelen malzemelerdir. En gelişmiş TE malzemeleri arasında, CoSb_3 esaslı skutteruditler (SKD), uygun bant yapısı, elektrikli taşıma, düşük maliyet ve toksik olmayan bileşen elementler gibi kapsamlı avantajları nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Yüksek ısıl iletkenliği ZT değeri için sorun oluşturmuş olsa da skutterudit boşluklarına dahil edilen daha küçük iyonlar ısıl iletkenliği istenilen düzeye uyarlar. TE cihazların performansında önemli etkenlerden biri olan malzemelerin, ZT değerleriyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Farklı

yenilikçi malzemeler oluşturulmuş TE uygulamalarına etkisi analiz edilmiştir. Farklı malzemelerin farklı sıcaklıklarda farklı ZT değerine sahiptir. ZT sıcaklığa bağlı bir değerdir ve her malzeme yüksek Z değerini belirli bir sıcaklık aralığında sunar [100]. Bu doğrultuda Şekil 3.6 TE sistemlerde kullanılan bazı malzemelerin sıcaklığa bağlı figure of merit (ZT) değerleri verilmiştir.



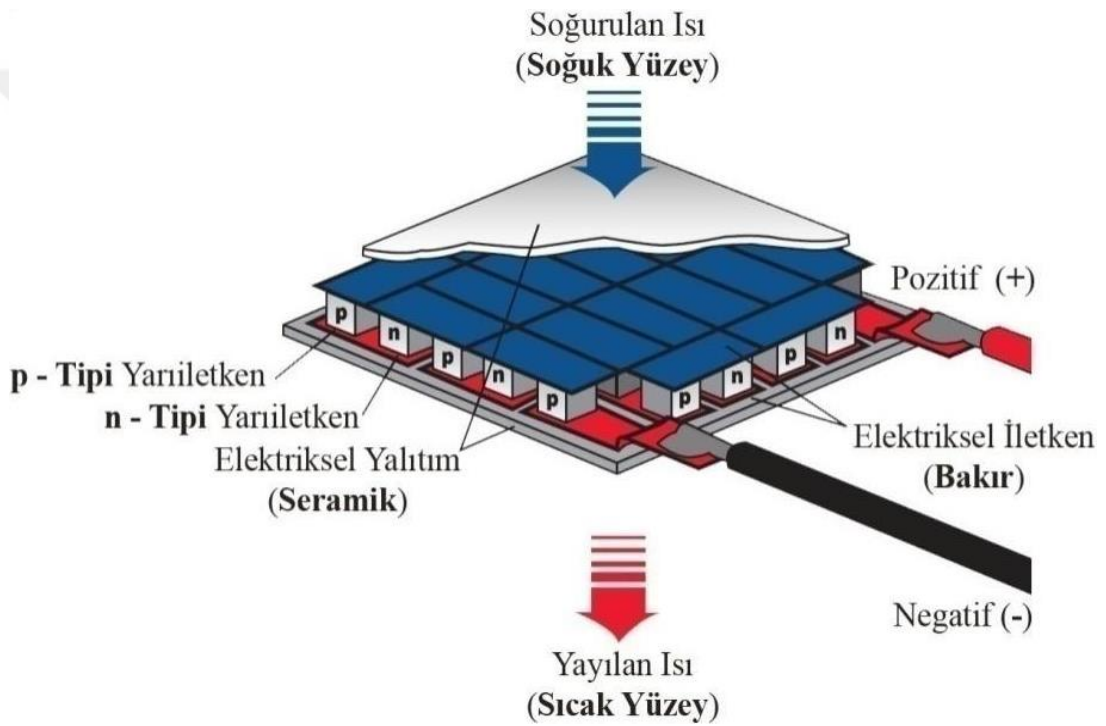
Şekil 3.6. Termoelektrik sistemlerde kullanılan bazı malzemelerin figure of merit değerleri [101]

4. TERMOELEKTRİK JENERATÖR (TEJ)

TEJ'ler, yarıiletken malzeme kullanımı sayesinde ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek, devreye bağlı bir yüke elektrik gücü sağlayan cihazlardır. Bu cihazlarda aynı amaçla kullanılan diğer cihazların aksine enerji dönüşüm süreci yoktur. Bu nedenle, TE enerji üretimi doğrudan güç dönüşümü olarak sınıflandırılmaktadır. Isı enerjisinin elektriğe doğrudan dönüştürülmesi birbiriyle ilişkili üç TE olgu tarafından kontrol edilir; Seebeck, Peltier ve Thomson etkileri ve bunlara Joule ısıtma ve Fourier ısı iletimi de dahil olmak üzere ek etkiler eşlik etmektedir [102]. TEJ'ler, uzun ömürlü kullanımları, yüksek dayanıklılıkları ve çevre dostu olmasıyla enerji uygulamalarında özellikle güç üretimini gerçekleştirmek için termal ısının geri kazanımının gerçekleştiği ortamlarda ön plana çıkan bir teknolojidir. Son yıllarda güneş enerjisinden faydalanılan fotovoltaik sistemlerde kullanımı mümkün olan bu cihazlara araştırmacılar tarafından büyük ilgi gösterilmektedir. Yapılan çalışmalarda bu cihazların farklı kullanım alanlarında farklı görevlerdeki tasarımları dikkat çekmektedir. TEJ'ler, otomobil egzoz borularına aracın alternatöründeki güç yükünü azaltmak için, floresan lambalara, televizyonlara, pompalara, fanlara veya kontrol panellerine güç sağlamak için biyokütle veya gaz yakıtlı ısıtıcılara monte edilmiş, ayrıca başka bir tasarımlarda, çeşitli mikro reaktörlere ve mikro yakıcılara TEJ'leri, taşınabilir/mobil elektronik cihazlar ve sensör ağ düğümleri için minyatür güç kaynakları olarak entegre edilmiş ve düşük enerji yoğunluğundaki elektrokimyasal piller ve karmaşık yerleşik reformerlere sahip yakıt hücrelerine alternatif oluşturmuştur [103].

Kullanım alanlarına göre istenilen boyutlarda tasarlanabilen TEJ'ler, TEM'lerden oluşmaktadır. TEJ tasarımı için yarıiletken, iletken ve yalıtkan malzemelerden faydalanılır. Yarıiletken ve iletken malzemedan oluşmuş TEM'ler, elektrik enerjisi üretmek için genellikle sıcak ve soğuk taraf olmak üzere ısı değiştiricileri (ısı kaynağı ve ısı alıcı) arasında sıkıştırılır. Bu ısı kaynağı ve ısı alıcı sistemden Seebeck voltajının elde edilmesini sağlayan sıcaklık gradyanının oluşumunu sağlamaktadır. TEM, elektriksel olarak seri ve termal olarak paralel bağlı yarı iletken malzemedan yapılmış ayaklardan (p ve n tipi), bu ayakları elektriksel olarak bağlayan iletken (elektrot) ve yalıtımı sağlayan seramik plakadan (soğuk ve sıcak) oluşur [104]. TEM, daha yüksek voltaj elde etmek veya sürdürmek için elektriksel olarak seri bağlanır ve ısı kaynağından modülün sıcak tarafına ve soğuk

tarafından uzağa ısı transferini kolaylaştırmak için ısı eşanjörlerine termal olarak paralel bağlanır. Yarıiletken ayakların (p ve n tipi) bir ucu T_h sıcaklıkta bir ısı kaynağı ile temas halindedir ve diğer ucu T_c sıcaklıkta bir ısı alıcıya maruz kalır. Böyle bir sıcaklık gradyanı altında, bağlı p ve n tipi yarıiletken ayaklar, harici bir yüke bağlandıklarında elektrik voltajı, akım ve dolayısıyla elektriksel güç üretir. Tek bir TEM'in ürettiği elektrik potansiyeli oldukça küçük miktardadır bu yüzden elektrik potansiyelini arttırmak için çok sayıda TEM'den yararlanır. Şekil 4.1'de çok sayıda TEM'den oluşmuş TEJ gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Çoklu modüllerin oluşturduğu termoelektrik jeneratör [105]

Cihazın tasarlanmasında kullanılan malzemeler, maruz kaldığı sıcaklık gradyanı, TE modül sayısı ve TE ayak boyutu gibi parametreler TEJ performansını etkiler. Belirlenen sıcaklık gradyanında genellikle aktarılan ısı ile TE ayak uzunluğu ile ters orantılıdır ancak maksimum verim için belirlenen şartlarda optimum TE ayak boyutu vardır. TE malzemelerin özellikleri ve TEJ verimliliği yapılan çalışmalarla önemli ölçüde iyileşmiş olsa da, ısının elektrik enerjisine dönüşümünün verimliliği hala Carnot döngüsününkinden daha yüksek bir değere ulaşamamıştır [106].

4.1. Termoelektrik Jeneratör (TEJ) Performans Analiz Denklemleri

TEJ, Seebeck etkisine dayanarak sıcaklık farkından voltaj üretir. Yarıiletken ayakların içinde bulunan elektron ve delikler yük taşıyıcı olarak kabul edilir. Sıcaklık gradyanı altında bulunan elektron ve delikler hareket ederek sıcak taraftan soğuk tarafa doğru yayılırlar [107]. Yük taşıyıcıların soğuk tarafta birikmesi sonucu delikler için pozitif, elektron için negatif net bir yük oluşur ve bu net yük oluşumu elektrostatik potansiyel farka yol açar. Sıcaklık farkına maruz kalan açık bir devrede TE etki ile üretilen V_{oc} elektrik potansiyel farkı, Seebeck elektromotor kuvveti ile karakterize edilir. Açık devre voltajı V_{oc} denklem 4.1’de yazıldığı gibidir [108].

$$V_{oc} = \int_{T_c}^{T_H} (\alpha_p - \alpha_n) dT \quad 4.1$$

α_p p tipi ayağın Seebeck katsayısı, α_n n tipi ayağın Seebeck katsayısı, T_H sıcak yüzeyin sıcaklığı, T_c soğuk yüzeyin sıcaklığıdır. Elektrikli taşıyıcıların çoğunluğu elektron olduğunda, yani bir n tipi yarıiletken, Seebeck katsayısı negatif değere sahiptir, çünkü elektron hareketinin yönü akımın tersidir. Öte yandan, elektrikli taşıyıcıların çoğunluğu delik olduğunda, yani p tipi bir yarı iletken, Seebeck katsayısı pozitif değere sahiptir. Toplam Seebeck katsayısı p ve n tipi yarıiletken ayakların sahip olduğu Seebeck katsayılarının yardımıyla bulunur (Denklem 4.2).

$$\alpha_p - \alpha_n = \alpha \quad 4.2$$

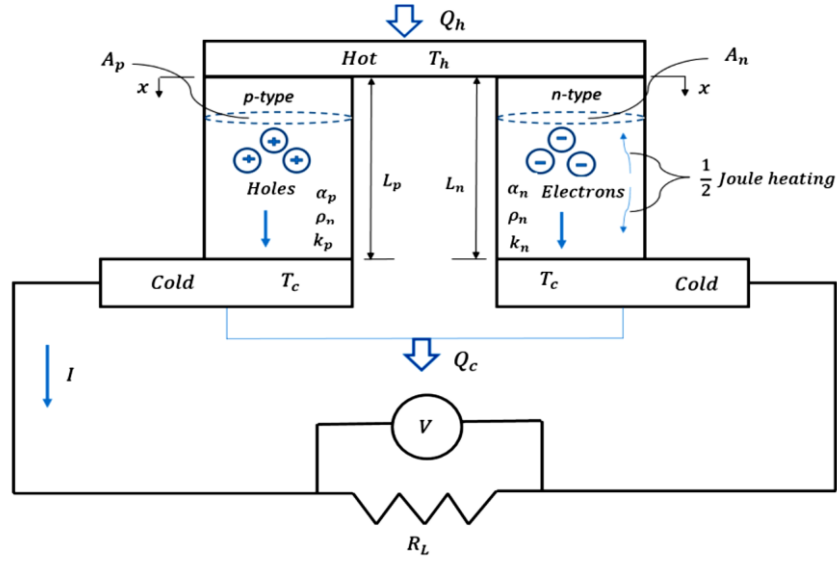
α toplam Seebeck katsayı ve ΔT sıcaklık farkı olmak üzere denklem 4.3 Seebeck voltajını belirtir.

$$V_{oc} = \alpha \cdot \Delta T \quad 4.3$$

Tekli modül için geçerli olan bu denklem, N adet çoklu modüle uyarlandığında açık devre voltajı, modül sayısı ile Seebeck voltajının çarpımıyla elde edilir.

$$V_{oc} = N \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad 4.4$$

Seebeck voltajını elektriğe dönüştürmek için, TE malzeme (veya malzeme serisi) boyunca elektrik akımına yol açacak bir yük bağlanmalıdır [109]. TEM harici bir direnç yüküne bağlandığında (Şekil 4.2) kapalı devre içinde bir yük akımı akışı meydana gelir, elektrik potansiyeli üretilir böylece elektrik gücü üretilmiş olur.



Şekil 4.2. Harici bir yük direncine bağlı termoelektrik jeneratör modülü [110]

Şekil 4.2'deki bir sistemde tekli TEJ modülü tarafından üretilen elektrik potansiyeli denklem 4.5 ile ifade edilir [111].

$$V = \frac{V_{oc} R_L}{R_L + R_{int}} \quad 4.5$$

N tane TEJ modülünde üretilen elektrik potansiyeli;

$$V = N \cdot \left(\frac{V_{oc} R_L}{R_L + R_{int}} \right) \quad 4.6$$

R_L yük direncini, R_{int} toplam iç direnci ifade eder ve termoelektrik ayaklar ile elektrotun iç direçlerinin toplamıyla bulunur (Denklem 4.7).

$$R_{int} = (R_p + R_n + 2 R_c) \quad 4.7$$

R_p p tipi ayağın iç direnci, R_n n tipi ayağın iç direnci, R_c elektrotun iç direnci olup toplam iç direnç denklem 4.8 ile elde edilir [112].

$$R_{int} = \frac{h_p \gamma_p}{A_p} + \frac{h_n \gamma_n}{A_n} + 2 \frac{h_c \gamma_c}{A_c} \quad 4.8$$

N adet TEJ modülü için toplam iç direnç denklem 4.9 vasıtasıyla oluşturulmaktadır.

$$R_{int} = N \cdot \left(\frac{h_p \gamma_p}{A_p} + \frac{h_n \gamma_n}{A_n} + 2 \frac{h_c \gamma_c}{A_c} \right) \quad 4.9$$

h TE ayağın yüksekliği, A TE ayağın kesit alanı ve γ elektriksel direnci ifade eder. Elektriksel direnç, elektriksel iletkenlikle ters orantılıdır ($1/\gamma$). Devreden geçen akımı bulmak için Ohm yasasından faydalanır. Ohm yasası devredeki voltaj (V), akım (I) ve direnç (R_L) arasındaki bağlantıyı verir. Bu kanununa göre, bir direncin terminalleri arasındaki potansiyel farkı ile üzerinden geçen akım doğru orantılıdır ve denklem 4.10 ile gösterilir [113].

$$V = I \cdot R_L \quad 4.10$$

TEJ modülünde üretilen elektriği en üst düzeye çıkarmak için, hem Joule ısıtması biçimindeki elektrik kayıpları hem de sıcak ve soğuk bağlantı noktaları arasındaki ısı akışından kaynaklanan termal kayıplar en aza indirilmelidir. TE etkileriyle üretilen elektrik potansiyel denklemi Ohm kanunuyla birleştirildiğinde devreden geçen akım denklem 4.11 yardımıyla bulunabilir.

$$I \cdot R_L = \frac{V_{oc} R_L}{R_L + R_{int}} \quad 4.11$$

$$I = \frac{(\alpha_p - \alpha_n) \Delta T}{(R_L + R_{int})} \quad 4.12$$

Maksimum elektrik akımı, harici yük (R_L) sıfıra eşit olduğunda elde edilir.

$$I_{max} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n) \Delta T}{R_{int}} \quad 4.13$$

Maksimum voltaj $I = 0$ (açık devre) olduğunda ortaya çıkar.

$$V_{max} = \alpha (T_h - T_c) \quad 4.14$$

Karmaşık termodinamik hesaplamaları basitleştirmek için çeşitli pratik ve gerçekçi varsayımlar kullanılmaktadır. Sıcak ve soğuk kavşakların ortama ısı transferi mükemmeldir. TE cihazdaki ısı yalıtımı mükemmeldir. TE cihazların bağlantı direnci, yarı iletken malzemenin kütle direncine kıyasla önemsizdir. Yarı iletken malzemelerin elektriksel iletkenliği (σ), termal iletkenliği (k) ve Seebeck katsayısı (α) sıcaklıktan bağımsızdır [114].

Sıcak ve soğuk taraf sıcaklıkları ile optimum ısı transfer yüzey alanı arasındaki ilişkiler, TEM'lerin hem sıcak hem de soğuk taraflarına diferansiyel bir alan üzerine enerji dengeleri uygulanarak hesaplanabilir.

Sıcak ve soğuk bağlantı noktalarındaki enerji korunumu, enerji taşınım mekanizmalarıyla gerçekleşir [115]. Sıcak bağlantı noktasında gerçekleşen taşınım mekanizmaları, rezistif ısıtmadan gelen giriş enerjisi (Q_{joule}), TE gücün elektrik enerji çıkışı (Q_{pel}) ve sıcak bağlantı noktasında soğuğa doğru gerçekleşen ısı çıkışıdır (Q_{cond}). Soğuk bağlantı noktasında gerçekleşen taşınım mekanizmaları, rezistif ısıtmadan gelen giriş enerjisi (Q_{joule}), TE gücün elektrik enerji girişi (Q_{pel}) ve sıcak bağlantı noktasında soğuğa doğru gerçekleşen ısı girişidir (Q_{cond}). Taşınım mekanizmaları aşağıdaki denklemlerle karakterize edilir [116].

Peltier etkisinin oluşturduğu enerji;

$$Q_{pel} = \alpha T_H I \quad 4.15$$

TEM'de meydana gelen geri dönüşü olmayan ana etki, dirençli bir cihazdan geçen akım akışının belirli bir miktarda ısı üreteceğini belirten Joule ısıtma yasası ile açıklanmaktadır. Joule ısıtma etkisinin oluşturduğu enerji;

$$Q_{joule} = I^2 R_{int} \quad 4.16$$

Isı iletimi geri dönüşü olmayan bir işlemdir ve negatif sıcaklık gradyanı yönünde bir ısı akışını indükleyen bir iletkende sıcaklık gradyanının varlığı nedeniyle ortaya çıkar [117]. İletim yoluyla gerçekleşen ısı enerjisi;

$$Q_{cond} = -k \Delta T \quad 4.17$$

k , toplam ısı iletkenlik katsayısıdır. TE ayakların (p ve n tipi) ve elektrotun ısı iletim katsayısının toplamına eşittir.

$$k = \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} + 2 \frac{k_c A_c}{L_c} \quad 4.18$$

N adet TEJ modülü için ısı iletkenlik katsayısı;

$$k = N \cdot \left(\frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} + 2 \frac{k_c A_c}{L_c} \right) \quad 4.19$$

Q_h , dış ısı kaynağından sisteme giren ısı miktarıdır ve denklem 4.20 ile elde edilir.

$$Q_h = k \Delta T + \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R_{int} \quad 4.20$$

Q_c soğuk kaynaktan ısı çıkışı miktarıdır ve denklem 4.21 ile hesaplanır.

$$Q_c = k \Delta T + \alpha T_c I + \frac{1}{2} I^2 R_{int} \quad 4.21$$

$\frac{1}{2} I^2 R_{int}$ değeri sıcak kavşaktaki Joule ısısının yarısının absorbe edilmediği, ancak TEM içinde dağıldığı varsayımına dayanmaktadır [118]. Sıcak ve soğuk bağlantı noktasındaki ısı farkı TEJ'in ürettiği gücü verir. Denklem 4.22 termodinamiğin birinci yasasını uygulayarak, TEM'de üretilen elektrik gücünü hesaplamamızı sağlar.

$$P = Q_h - Q_c \quad 4.22$$

Daha önce belirlenen Q_h ve Q_c değerleri yerine yazıldığında denklem 4.23 elde edilmiş olur.

$$P = \alpha I (T_h - T_c) - I^2 R_{int} \quad 4.23$$

TEJ çıkış gücü Ohm yasasına göre de hesaplanabilmektedir. Ohm yasasından faydalanılarak elde edilen TEJ çıkış gücü denklem 4.24' deki gibidir.

$$P = I^2 \cdot R_L \quad 4.24$$

Hesaplanan akım değeri yerine konulduğunda denklem 4.25 oluşur.

$$P = I^2 \cdot R_L = \left(\frac{\alpha (T_h - T_c)}{R_L + R_{int}} \right)^2 R_L \quad 4.25$$

N adet TEJ modülünde üretilen elektrik gücü;

$$P = N \left(\frac{\alpha (T_h - T_c)}{R_L + R_{int}} \right)^2 R_L \quad 4.26$$

TEJ' de maksimum gücü elde etmek için $R_{int} = R_L$ olmalıdır.

$$P_{max} = \frac{V_{oc}^2}{4R_{int}} \quad 4.27$$

Modülün elektrik gücünün, sıcak bağlantı noktasında absorbe edilen ısı gücüne oranı (denklem 4.28) TEJ modülünün verimini verir [119].

$$\eta = \frac{P}{Q_h} \quad 4.28$$

TEJ veriminin hesaplanmasında kullanılan 4.28 numaralı denklemde, TEJ çıkış gücü ve sıcak tarafta absorbe edilen ısı miktarı yerine yazıldığında denklem 4.29 oluşur.

$$\eta = \frac{I^2 R_L}{k \Delta T + \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R_{int}} \quad 4.29$$

TEJ' in çıkış gücünde R_L yük direnci önemli bir faktördür. R_L/R_{int} oranına göre güç çıkışı bulunabilir.

$$P = \frac{\alpha^2 (T_h - T_c)^2}{R_{int}} \frac{\frac{R_L}{R_{int}}}{\left(1 + \frac{R_L}{R_{int}}\right)^2} \quad 4.30$$

TEJ modülünde kullanılan malzemelerin figure of merit (ZT) değerleri modülün ısı verimliliğinde etkilidir. Malzemenin bu değeriyle birlikte, Carnot verimliliğinden $\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right)$ ve R_L/R_{int} oranından yararlanılarak ısı verimlilik denklem 4.31 ile hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \frac{R_L}{R_{int}}}{\left(1 + \frac{R_L}{R_{int}}\right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) + \frac{\left(1 + \frac{R_L}{R_{int}}\right)^2 \frac{T_c}{T_h}}{ZT_c}} \quad 4.31$$

ZT_c , boyutsuz figure of merit değeridir ve malzemelerin sıcaklığa bağlı değişen özelliklerinin etkilerini içerecek şekilde tanımlanır. Termodinamik ile ZT' nin değerine herhangi bir kısıtlama getirilmemektedir, çünkü bu miktar sonsuz olursa, TE verimlilik hala Carnot döngüsününkinden daha büyük olmayacaktır. Maksimum dönüşüm verimliliği bulmak için aşağıdaki eşitliklerden yararlanılır.

$$\frac{d\eta}{d\left(\frac{R_L}{R_{int}}\right)} = 0 \quad \frac{R_L}{R_{int}} = \sqrt{1 + Z\bar{T}} \quad 4.32$$

Eşitliği sağlanmalıdır. \bar{T} , sıcak ve soğuk bağlantı noktaları arasındaki ortalama sıcaklıktır.

$$\bar{T} = \frac{T_h + T_c}{2} \quad 4.33$$

η_{TE} , dönüşüm verimliliği, ΔT sıcaklık farkına ve $Z\bar{T} = \alpha^2 T / \gamma k$ olarak tanımlanan ve üç ana malzeme parametresi (Seebeck katsayısı veya termo güç (α), elektrik direnci (γ), termal iletkenlik (k)) ile belirlenen figure of merit değerine bağlıdır [120]. Bunlar dikkate alındığında maksimum dönüşüm verimliliği denklem 4.34 ile bulunur.

$$\eta_{TE} = \left(1 - \frac{T_c}{T_h} \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_c}{T_h}} \right) \quad 4.34$$

TEJ için maksimum güç verimi $\frac{R_L}{R_{int}} = 1$ olduğunda elde edilir. η_{mc} , maksimum güç verimi olmak üzere denklem 4.35 ile TEJ maksimum verimi verir.

$$\eta_{mc} = \frac{\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right)}{2 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) + \frac{T_c}{ZT_c}} \quad 4.35$$

4.2. Termoelektrik Jeneratör (TEJ) Enerji Dönüşüm Denklemleri

TEJ' de ısı ve elektrik akışları ısı denklemi ve enerji korunum yasası tarafından yönetilir. Kararlı durum koşulları altında ve uygulanan manyetik alanın yokluğunda termoelektrik malzemelerde Seebeck, Peltier, Thomson etkilerinin bağlantı mekanizmaları hesaba katılarak çok boyutlu sıcaklık ve elektrik potansiyel profillerini düzenleyen denklemler geliştirilmiştir [121]. Fourier yasasını içeren genişletilmiş Joule ısıtma etkisi enerji korunumu denklem 4.37 ile ifade edilebilir.

$$\nabla (k \cdot \nabla T) - T J \frac{\delta \alpha}{\delta T} + \sigma \cdot J = 0 \quad 4.37$$

Burada k ısı iletkenlik, α Seebeck katsayısı, σ elektrik iletkenliği, ∇ değişimi veren skaler fonksiyon, T sıcaklık ve J akım yoğunluğudur. Isı akışı ve elektrik yükü termoelektrik etki uygulaması süreklilik denklemleriyle ifade edilir. İzotropik özelliklere sahip düzgün ısıtılmayan bir malzeme olduğu varsayılarak, sabit bir akım için süreklilik denklemi,

$$\nabla \cdot J = 0 \quad 4.38$$

Ohm yasası ve Seebeck etkisine göre, çoğunlukla sıcaklık eğimi ve akan akımdan etkilenen elektrik alanı [122],

$$E = \sigma \cdot J + \alpha \nabla T \quad 4.39$$

Isı akışı ayrıca sıcaklık gradyanı ve elektrik alanından etkilenir. Böylece, ısı akış yoğunluğu Thompson ilişkisi (Denklem 4.40) kullanılarak tanımlanabilir [123].

$$q = \Pi J - k \nabla T \quad 4.40$$

k ısı iletkenlik, Π Peltier katsayısıdır. Zamanla değişen manyetik alanın yokluğunda, E dönüşsüz hale gelir ve elektrikli skaler potansiyelden türetilir.

$$E = - \nabla \phi \quad 4.41$$

5. TASARLANAN TERMOELEKTRİK JENERATÖR SİSTEMİNDE KULLANILAN NANOAKIŞKANLAR

Isı transfer performanslarıyla büyük bir öneme sahip olan nanoakışkanlar birçok yenilenebilir enerji uygulamalarında kullanılmaktadır. Çok çeşitli alanlarda kendine yer edinmiş nanoakışkanlar enerji dönüşüm uygulamalarından biri olan TE sistemlerde de kullanılmaktadır. Bu çalışmada incelenen TEJ'de ısı değiştirici iş akışkanı görevindedir. Tasarlanan sistemde kanal içinden akan sıcak ve soğuk akışkan olarak sistemin sıcaklık gradyanını oluşturmuştur. Pek çok farklı parçacıkla ve baz sıvıyla kombinasyonu mevcut olan nanoakışkanlar farklı termodinamik özellikler sunar. Tasarlanan model için su bazlı MgO/Ag (magnezyum oksit-gümüş) hibrit nanoakışkan ve CNT (karbon nano tüp) nanoakışkan tercih edilmiştir. Bu nanoakışkanlar, farklı hacim oranı ve Reynolds sayısı gibi parametrelerde incelenmiş ve TEJ verimine etkisi analiz edilmiştir.

5.1. Nanoakışkan

Enerji sistemlerinde kullanılan iş akışkanının ısı transferini geliştirmek için uzun süredir çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bir akışkan yoluyla gerçekleşen ısı transferi, geometri, sınır koşulları ve termodinamik özellikler (termal iletkenlik, dinamik viskozite, ısı kapasitesi ve sıvının özgül kütlesi) gibi birçok faktörden etkilenebilir. Maxwell, elektriksel veya ısıl iletkenliği arttırmak için baz sıvı içerisine metalik parçacıkların süspansiyonunu önermiştir [124]. Maxwell bu fikir ile ısı transferinin arttırılabileceğini belirtmiş daha sonra bu çalışma araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Bu gelişmeler doğrultusunda Choi ve Eastman 1995 yılında ABD'nin Argonne Ulusal Laboratuvarı'nda, büyük pompalama gücü gerekmeksizin ısı transferini arttırma kabiliyetine sahip olan nanoakışkan fikrini ortaya koymuştur. Nanoakışkanlar, geleneksel ısı transfer sıvılarında (su, etilen glikol ve motor yağı) nanometre büyüklüğündeki malzemelerin (partiküller, fiberler, tüpler, teller, çubuklar, tabakalar veya damlacıklar) süspansiyonuyla tasarlanabilen ve temel sıvıların termal iletkenliğini ve konvektif ısı transfer performansını önemli ölçüde arttırabilen yeni ısı transfer sıvıları sınıfı olarak tanımlanır [125, 126].

Katı malzemelerin ısıl iletkenliği sıvılara göre daha yüksek değere sahiptir. Nanoakışkanı oluşturmak için bakır (Cu), gümüş (Ag), nikel (Ni), alüminyum (Al), altın (Au), demir (Fe) gibi metaller Al_2O_3 , bakır oksit (CuO), demir oksit (Fe_3O_4),

titanyum oksit (TiO_2), magnezyum oksit (MgO), çinko oksit (ZnO) gibi metal oksitler kullanılabilir [127, 128]. Ayrıca kalsiyum karbonat ($CaCO_3$), karbon nanotüp (CNT), silisyum karbür (SiC) gibi bileşiklerde kullanılabilir [129]. Temel akışkana eklenen ısı iletkenliği yüksek parçacıklar genellikle 1-100 nm boyutunda tercih edilir bunun nedeni büyük boyutlara sahip parçacıkların yığılma, yüzey erozyonu ve kanalları bloke etme eğiliminde olmalarıdır. Nanoakışkan, Maxwell'in önerdiği geleneksel sıvı ve mikro boyutlu parçacıkların süspansiyonu ile kıyaslandığında, aşağıdaki belirtilen özelliklerden dolayı ısı transferinin iyileşmesinde daha yüksek bir potansiyele sahiptir [130]:

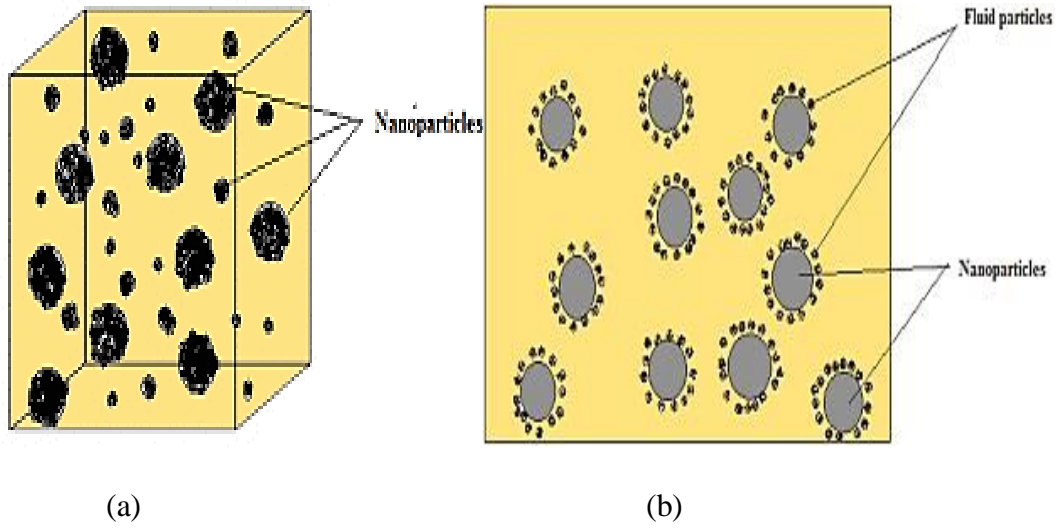
- Sıvı ve parçacık arasında yüksek ısı transfer yüzeyi oluşur buna bağlı olarak ısı iletkenliği yükselir.
- Parçacıklar baskın Brownian hareketi ile yüksek dispersiyon kararlılığındadır.
- Eşdeğer ısı transferi yoğunlaştırması elde etmek için saf sıvıyla karşılaştırıldığında azaltılmış pompalama gücü mevcuttur.
- Geleneksel süspansiyonlara kıyasla daha az partikül tıkanması, bu nedenle mikro sistemlerde kullanımı uygundur.
- Farklı uygulamalar için hacim oranlarını değiştirerek ısı iletkenlik ve yüzey ıslanabilirliği gibi özelliklerinin değiştirilebilmesidir.

Nanoakışkanlar genellikle iki yöntemle hazırlanırlar. Bunlar tek ve iki aşamalı sentez yöntemidir. Tek aşamalı sentez, nanoakışkanın, parçacık kurutma, saklama, karıştırma ve parçacığın baz akışkanı içinde dağıtılması gibi ara aşamaların gerçekleşmediği doğrudan baz sıvı içinde hazırlanan yöntemdir. Tek aşamalı yöntemde, parçacıkların sentezi ve parçacıkların baz akışkanlarda dispersiyonu aynı anda gerçekleştirilir [131, 132]. İki aşamalı sentez yöntemi nanoakışkanın hazırlanmasında en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde geleneksel baz sıvı içerisine parçacıkların hazırlanması ve dağıtılması ayrı ayrı ele alınır. Bu yöntem kolayca hazırlanabilir ve uygun maliyetlidir. Yöntemin en büyük dezavantajı ise parçacık topaklanma eğiliminin kontrol edilmesidir. Tek aşamalı sentez yöntemine göre hazırlanan nanoakışkanların stabilitesi, iki aşamalı sentez yöntemine göre daha yüksektir.

Geleneksel akışkanlara ısı özellikleriyle üstünlük sağlayan nanoakışkanlar birçok araştırmaya konu olmuştur. Özellikle sıvıların ısı transferini etkileyen

termofiziksel parametreler araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin, katı parçacıkların hacim oranı, dağılmış katı faz olarak kullanılan nano malzemenin şekli ve boyutu, parçacık ve baz sıvının termofiziksel özellikleri, nanoakışkanın sıcaklığı, ara yüzey tabakası oluşumu, parçacık kümelenmesi ve nanoakışkanın pH değerı gibi birçok parametreden etkilenebileceğini göstermiştir [133].

Akışkanların ısı iletkenlikleri ve dinamik viskozite değerleri ısı transfer performanslarını belirlemede diğer termo fiziksel özelliklere göre daha büyük önem taşır. Enerji dönüşüm süreci verimliliğini önemli ölçüde artıran nanoakışkanların performansını belirleyen ana etkenin ısı iletkenlik olduğu belirtilir. Isı iletkenlik değişimini araştırmak için yapılan deneylerde ısı iletkenliği yüksek katı parçacıkların geleneksel sıvıya eklenerek ısı iletkenliği sistematik olarak arttırmasının nedeni olarak parçacıkların sıvı içindeki Brownian hareketi, sıvı ve parçacık ara yüzeyindeki ısı direnç (Kapitza direnci), parçacıkların yüksek yüzey alanı, kümeleşme gibi çeşitli mekanizmalar olduğu düşünölmüştür [134]. Birçok araştırmacı parçacıkların sıvı süspansiyonlarının ısı davranışında kilit mekanizma olan Brownian hareketinin ısı transferinde belirgin bir artışa neden olduğuna inanmaktadır. Brownian hareketinin neden olduğu konveksiyon, nanoakışkanların arttırılmış ısı iletkenliğini açıklayan önemli bir dinamik olgudur. Kapitza direnci, bir ara yüzde ısı enerji taşıyıcı saçılmasından kaynaklanan ısı sınır direncidir ve taşıyıcı tipi ara yüzleri yöneten malzemelere bağlıdır. Ara yüzlerdeki sınır direncin azalması sistemin toplam direncinin azalmasıyla sonuçlanacaktır. Bu iki mekanizma şekil 5.1'deki gibi gerçekteşir. Ayrıca baz sıvı içerisindeki nano parçacık diziliminin doğrusal bir düzenek oluşturması, ısı transferi için daha hızlı bir yol (daha hızlı ısı dağılımı) sağlayacağı düşünölmöür. Toplama ve yayılma mekanizması olarak adlandırılan bu durum akışkanın ısı transferini belirleyen parametreler arasında yer almaktadır.



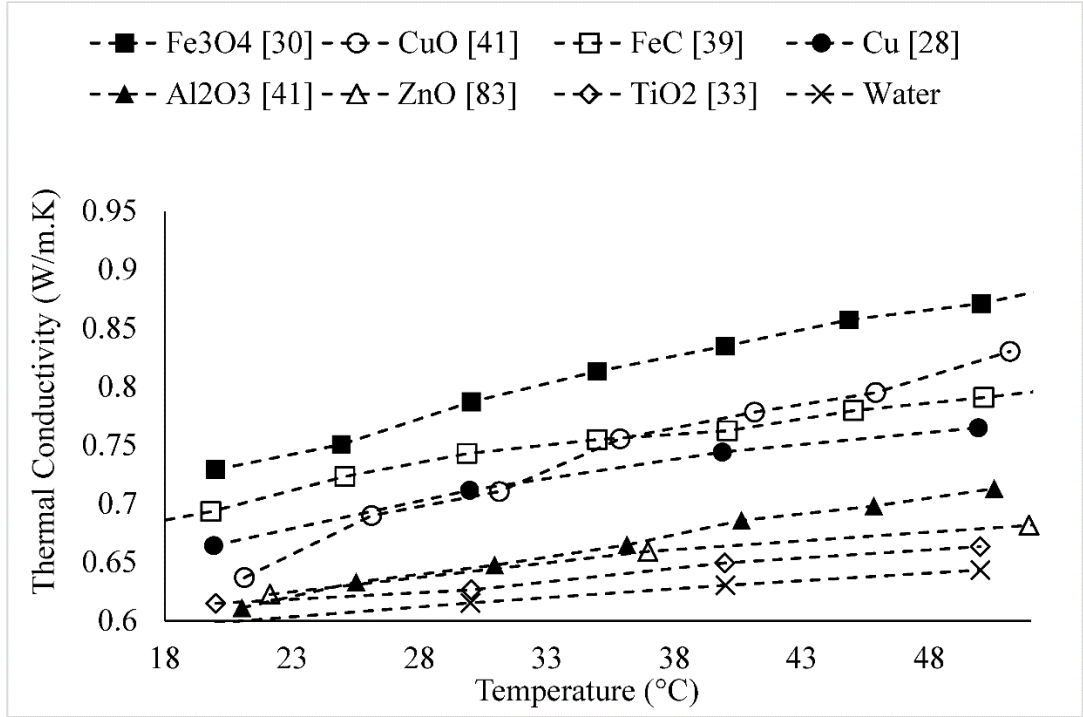
Şekil 5.1. Nanoakışkanların ısı iletkenliğini etkileyen mekanizmalar (a) Brownian hareketi (b) baz sıvı ile katı parçacığın oluşturduğu katı/sıvı ara yüzey tabakası [135]

Isıl iletkenlik üzerinde etken olan bu mekanizmalar dışında nanoakışkanın termofiziksel özelliklerini belirleyen parçacık boyutu, hacim oranı, kullanılan parçacığın ve baz sıvının ısı özellikleri ve sıcaklık gibi parametrelerde nanoakışkanın ısı iletkenliğini değişimine sebep olur ve akışkanın performansını etkiler [136]. Sıvı-katı süspansiyonların ısı iletkenliğinin belirlenmesinde ilk olarak Maxwell modeli kullanılmıştır. Maxwell modeli, rastgele dağılmış, muntazam boyutta ve etkileşmeyen küresel parçacıklara sahip istatistiksel olarak homojen ve düşük hacim oranlı sıvı katı süspansiyonlar için geçerli bir modeldir [137]. Sonrasında yapılan çalışmalar ısı iletkenliğinin belirlenmesinde birçok yöntem oluşturmuştur. Baz sıvıda asılı katı parçacığın termal iletkenliğini tahmin etmek için çeşitli teorik denklemler geliştirilmiş, bazıları burada temelleri dikkate alınarak tablo haline getirilmiştir.

Tablo 5.1. Nanoakışkanların ısı iletkenliğinin belirlenmesinde kullanılan bazı hesaplama modelleri [138]

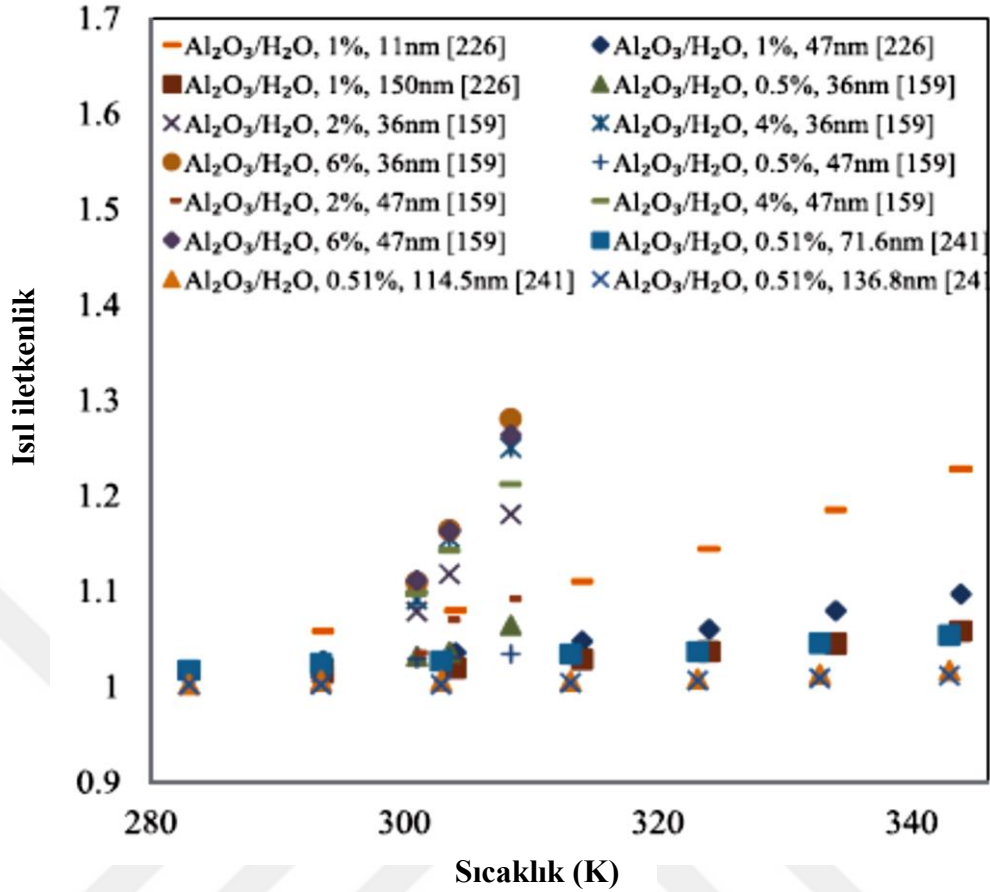
Maxwell modeli	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} + k_{bf})\phi}{k_{np} + 2k_{bf} - (k_{np} - k_{bf})\phi}$
Bruggemen modeli	$\phi \left(\frac{k_{np} - k_{nf}}{k_{np} + 2k_{nf}} \right) + (1 - \phi) \left(\frac{k_{bf} - k_{nf}}{k_{bf} + 2k_{nf}} \right) = 0$
Hamilton ve Crosser modeli	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (n-1)(k_{np} + k_{bf})\phi}{k_{np} + (n-1)k_{bf} + (k_{np} + k_{bf})\phi}$
Yu ve Choi modeli (Düzenlenmiş Maxwell modeli)	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{pe} + 2k_{bf} + 2(k_{pe} + k_{bf})(1+x)^3\phi}{k_{pe} + 2k_{bf} - (k_{pe} - k_{bf})(1+x)^3\phi}$
Xuan modeli	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} - 2(k_{np} + k_{bf})\phi}{k_{np} + 2k_{bf} + (k_{np} + k_{bf})\phi} + \frac{\rho_{np} \phi (C_p)_{np}}{2} \sqrt{\frac{kT}{3\pi\mu_{bf} r_c}}$

Nanoakışkanı oluşturan her nano parçacığın termofiziksel özellikleri farklılık gösterir. Eşit koşullar altında aynı baz sıvı ve hacim oranı ile oluşturulan farklı nanoakışkanların tüm termofiziksel özelliği gibi ısı iletkenliği de birbirinden farklı olur. Farklı nano parçacıkların, nanoakışkan ısı iletkenliği üzerindeki etkisini inceleyen Simpson ve ark. [139], baz akışkan olarak suyun kullanıldığı, 0,01 hacim oranındaki farklı nanoparçacıklarla oluşturulan nanoakışkanların sıcaklığa bağlı değişimlerini incelemiştir (Şekil 5.2). Sonuç olarak nanoakışkanların ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değiştiğini ve farklı nanoparçacıklarla oluşturulan nanoakışkanların ısı iletkenliğinde farklı olduğunu gözlemlemiştir.



Şekil 5.2. Farklı nanoparçacıklar için 0,01 hacim oranında sıcaklığın bir fonksiyonu olarak su bazlı nanoakışkanın ısı iletkenlik değışimi [139]

Hacim oranının ısı iletkenlik üzerindeki etkisiyle ilgili yapılan çalışmalar hacim oranının ısı iletkenliği arttırdığını göstermiştir. Ancak çalışmalar nanoakışkanın ısı iletkenliğinin optimum hacim oranında maksimum değere ulaştıktan sonra daha fazla parçacık eklenmesinin ısı iletkenliği olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir. Isı iletkenliği etkileyen parametrelerden olan parçacıkların hacim oranı ve parçacık boyutudur. Bu konu hakkında çeşitli çalışmalar yapılmış hacim oranının ısı iletkenlik üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Ambreen ve Kim [140], farklı akışkan sıcaklığı, hacim oranı ve nano parçacık boyutuyla ilgili yaptığı çalışmada su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanını referans alıp daha önce yapılan birçok çalışmayı düzenlemişler ve bu değerlerin nanoakışkanın ısı iletkenliği üzerindeki etkisini incelediklerinde Şekil 5.3'deki gibi sonuç elde etmişlerdir.



Şekil 5.3. Farklı parçacık boyutunda ve hacim oranında su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik değişimi [140]

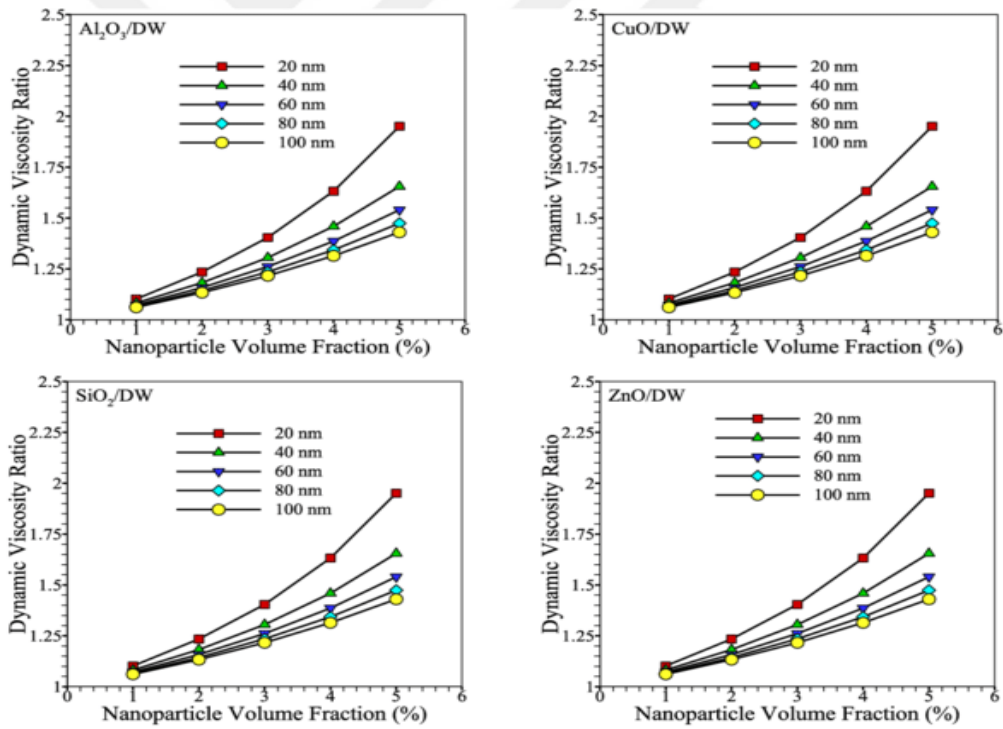
Daha yüksek sıcaklık ve hacim oranında nanoakışkanların ısıl iletkenlikleri artış göstermiştir. Isıl iletkenlik parçacıkların yoğunlaştırılmış Brownian hareketi nedeniyle daha yüksek sıcaklıkta daha yüksek bir değere ulaşır. Bu özellik nanoakışkanları yüksek sıcaklık uygulamaları için iyi bir alternatif haline getirir. Parçacıkların Brownian hareketi, Brownian difüzyon katsayısına bağlıdır ve sıcaklıkla doğru orantılıdır, ancak parçacıkların çapıyla ters orantılıdır. Daha yüksek sıcaklıklarda daha küçük çaplı ilave parçacıkların aralarında daha ciddi çarpışmalara neden olduğu ima edilir, bu da daha iyi ısıl iletkenliğe yol açar [141].

Isı transferini etkileyen bir diğer parametre dinamik viskozite, akışa karşı sıvı direncidir ve akışın olduğu ısıl uygulamalarda ana özellikler arasında yer alır. Nanoakışkanların viskozite değeri genel olarak nano parçacıkların konsantrasyonu ile orantılıdır. Bu davranış, nano tanecikler ve sıvı arasında, nano ölçekli parçacık boyutlarına sahip süspansiyonlara önemli ölçüde katkıda bulunan bir sınır tabakasının varlığı ile ilişkilidir.

Tablo 5.2. Nanoakışkanların dinamik viskozite değerlerinin belirlenmesinde kullanılan bazı hesaplama modelleri [142]

Einstein modeli	$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2,5\phi)$
Brinkman modeli	$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2,5}}$
Lundgren modeli	$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2,5\phi + \frac{25}{4} \phi^2 + f(\phi^3))$
Batchelor modeli	$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2,5\phi + 6,25\phi^2)$
Pak ve Cho modeli	$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 39,11\phi + 533,9\phi^2)$

Şekil 5.4, nanopartikül çapının, nanopartikül boyutunun bir fonksiyonu olarak farklı nanopartikül tiplerinin dinamik viskozite oranına etkisini göstermektedir.



Şekil 5.4. Farklı parçacık boyutlarında ve hacim oranlarında nanoakışkanların dinamik viskozite değişimleri [143]

Konveksiyon yoluyla ısı transferinde akışkanların yüksek ısı iletkenliğe sahip olması olumlu bir etki yaratırken dinamik viskozite değerinin yüksek olması olumsuz bir etki oluşturur [144].

Akış Reynolds sayısı, çalışma sıvısının yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Bu yüzden nanoakışkanların ısı transfer katsayısını hesaplamak için etkili yoğunluğun kesin bir tahmini önemlidir. Ayrıca, etkin yoğunluk nanoakışkanların akışını içeren uygulamalarda pompalama kaybının ve basınç düşüşünün belirlenmesinde önemli bir rol oynar [145]. Katıların yoğunluğu sıvıların yoğunluğundan daha yüksek olduğu için, sıvıya nano parçacıkların eklenmesiyle genellikle nanoakışkan yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Nanoakışkanların yoğunluğunun belirlenmesinde, katı ve sıvı malzemelerin yoğunluk değerlerinin yanı sıra katı parçacığın hacim oranı etkilidir. Nanoakışkan yoğunluğunu hesaplamak için denklem 5.1' den faydalanılır ve ısı performansını belirleyen termofiziksel özelliklerden biri olan özgül ısı kapasitesi (C_p) denklem 5.2 ile ifade edilir [146].

$$\rho_{nf} = (1 - \phi_p) \rho_f + \phi_p \rho_p \quad 5.1$$

ρ_{nf} nanoakışkan yoğunluğu, ρ_f baz sıvı yoğunluğu, ρ_p katı parçacığın yoğunluğunu ve ϕ_p katı parçacığın hacim oranını ifade eder. Özgül ısı kapasitesi;

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi_p) \rho_f (C_p)_f + \phi_p (\rho C_p)_p \quad 5.2$$

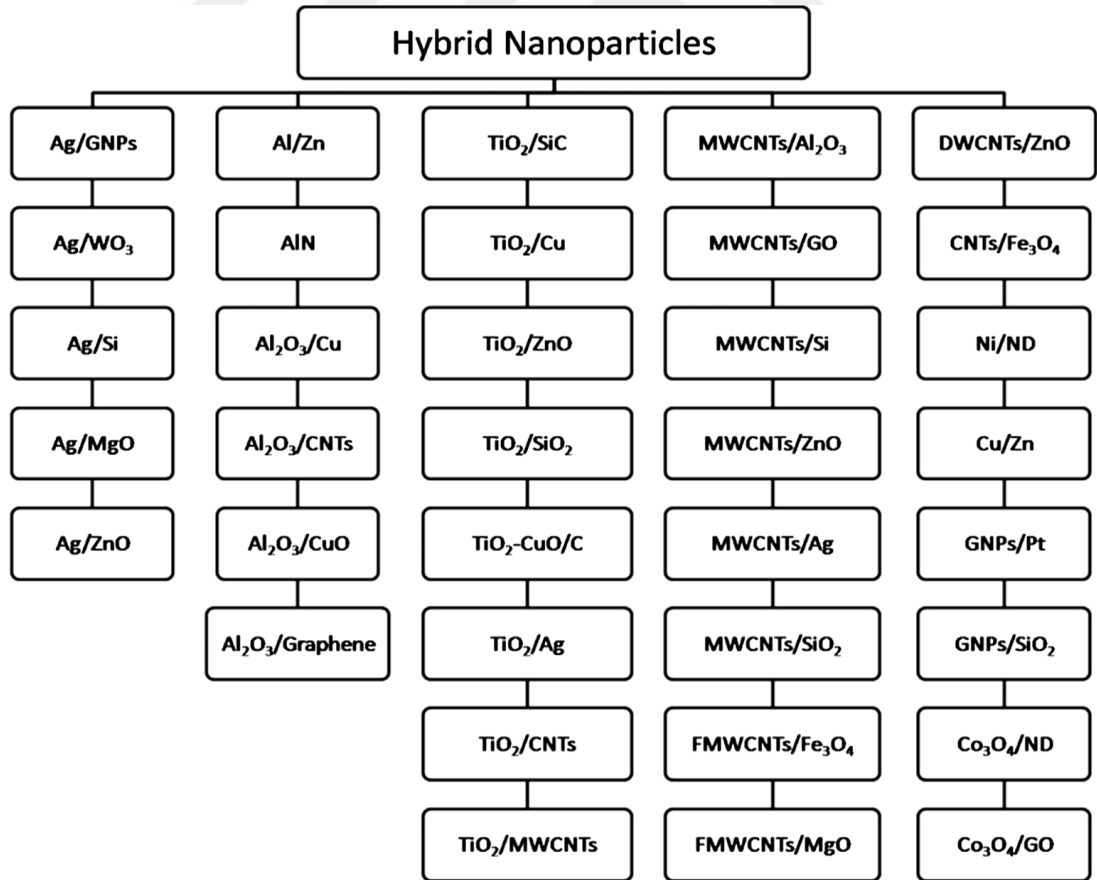
Nanoakışkan yoğunluğunda etkili olan katı parçacığın hacim oranı özgül ısı kapasitesinde de etkilidir ve yapılan araştırmalar, nano parçacık hacim oranı arttıkça nanoakışkanın özgül ısısının kademeli olarak azaldığını göstermiştir.

Nanoakışkanlar, geleneksel akışkanlara göre daha iyi ısı transfer performansına sahip olmasıyla güneş enerjisi sistemleri, otomotiv sektörü, soğutma sistemleri, tıbbi ve askeri uygulamalar gibi birçok alanda yer edinmiştir. Nanoakışkanlar ısı performanslarıyla birçok avantaja sahip olmalarının yanı sıra, yüksek üretim maliyetline sahip olmaları, parçacıkların agregasyon ve sedimentasyon olmadan uzun süreli kullanım için nanoakışkanların korunması sorunu, baz sıvılara kıyasla daha yüksek viskoziteye sahip olmalarıyla eşit pompalama gücünde artışa neden olmaları ve sürtünmeli ısıtma hızını arttırmaları, nanoakışkanın kullanımının korozyon ve erozyon oranlarını artırma olasılığı gibi dezavantajlara da sahiptir.

5.1.1. Su Bazlı Magnezyum Oksit-Gümüş (MgO/Ag) Hibrit Nanoakışkan

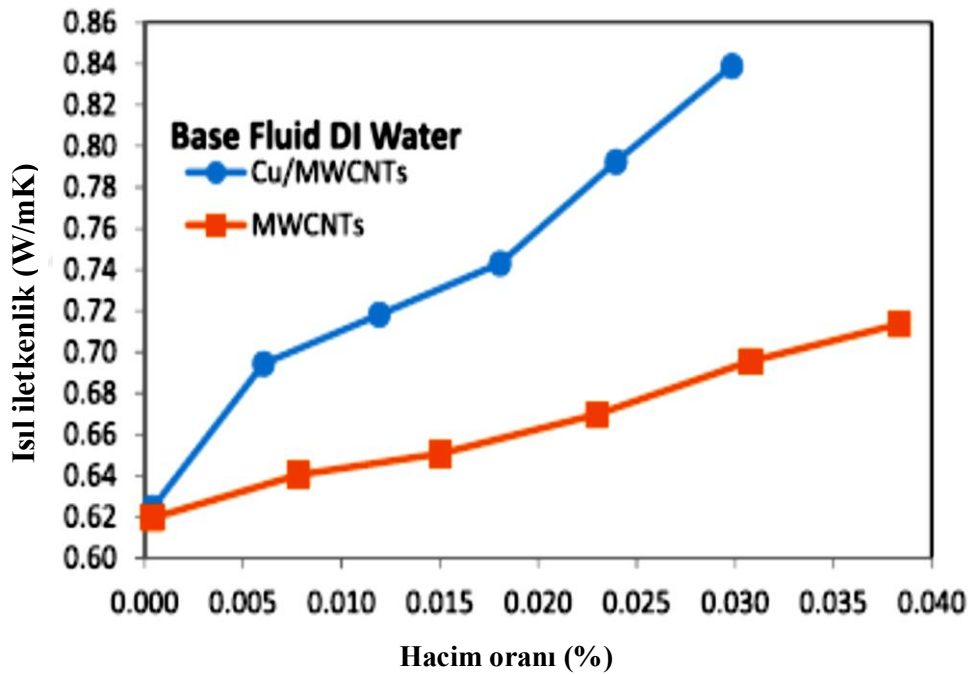
Nanoakışkanların ısı iletkenlikleriyle ilgili kaydedilen ilerlemeler potansiyel oluşturmuş, ısı transferi akışkanlarının özelliklerinin geliştirilmesine daha fazla önem verilmesini sağlamıştır. Tek parçacıkla oluşturulan nanoakışkanın ısı iletkenliğinde

oluşabilecek gelişme, iki veya daha fazla farklı parçacığın hibridizasyonu ile elde edilebilir ve hazırlanan bu yeni kompozit parçacıklar hibrit parçacıklar olarak adlandırılır. İki veya daha fazla parçacığın geleneksel sıvıya dağıtılıp sentezlenmesiyle yeni nano teknoloji sıvısı olan hibrit nanoakışkan elde edilir [147, 148]. Hibrit nanoakışkanı oluşturan parçacıklar fiziksel ve kimyasal bağlarla baz sıvıyla homojen bir karışım oluşturur. Hibrit nanoakışkan, sinerjistik etki nedeniyle mono nanoakışkanlara kıyasla termofiziksel, hidrodinamik ve ısı transfer özelliklerinde umut verici bir gelişme sağlamaktadır [149]. Örneğin, nanoakışkanı oluşturan Al_2O_3 , Si_2O_2 , TiO_2 gibi oksit parçacıklar iyi kimyasal atıllık ve stabilite gösterir ancak ısı iletkenlikleri gümüş, bakır ve altın gibi metallere veya elmas, karbon nanotüpler ve grafen gibi karbon bileşiklerinden daha düşüktür, kimyasal olarak reaktif ve kararsızdırlar. Nanoakışkanlarda sinerjik etkiyi elde etmek, düşük ısı iletkenlik ve stabilite sorunlarına çözüm bulmak için birden fazla bileşenli parçacık kombinasyonu kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 5.5 bazı çalışmalarda hibrit nanoakışkanı oluşturmak için kullanılan malzeme kombinasyonları gösterir.



Şekil 5.5. Hibrit nanoakışkanı oluşturmak için kullanılan bazı farklı nanoparçacık kombinasyonları [150]

Nano boyuttaki malzemeler aynı hacim oranlarına sahip ya da farklı hacim oranlarında kullanılabilir. Hibrit nanoakışkanlar, ısı transferini ve basınç düşmesi özelliklerini daha da geliştirebilecek daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olabilir [151]. Konuyla ilgili yapılan çalışmalarda hibrit nanoakışkanların ısı transferinin araştırılması mono nanoakışkanı etkileyen parametreler doğrultusundadır. Çalışmalar sonucunda hibrit nanoakışkanların mono nanoakışkanlara göre daha yüksek ısı transfer özellikleri, kararlılık, fiziksel mukavemet, mekanik direnç gibi özelliklere sahip olduğu rapor edilmiştir. Araştırmacılar özellikle ısı transferi için en etken parametrelerden biri olan ısıl iletkenlik üzerinde yoğunlaşmışlardır. Örneğin, Jha ve Ramaprabhu [152], su bazlı MWCNT/Cu hibrit nanoakışkan ve su bazlı MWCNT nanoakışkanın ısıl iletkenliğini ayrı ayrı değerlendirmişler ve hibrit nanoakışkanın nanoakışkana göre daha yüksek bir ısıl iletkenliğe sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.



Şekil 5.6. Mono MWCNT nanoakışkan ile hibrit Cu/MWCNT nanoakışkanın hacim oranına bağlı ısıl iletkenlik değişimi [152]

TEJ verimine etkisi incelenecek nanoakışkanlardan biri olan su bazlı MgO/Ag (magnezyum oksit/gümüş) hibrit nanoakışkanın ısıl özellikleri ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Sheikhzadeh ve ark. [153], geçirgen bir kanalda MgO /Ag su mikropolar hibrit nanoakışkanın laminer akışı, ısı transferi ve mikro rotasyonunu incelemek için LSM (en az kare yöntemi) uygulamışlardır. Kanalın alt

duvarını sıcak tutup, üst duvardan kanala soğutucu sıvı enjekte etmişlerdir. Su bazlı ve eşit miktarda MgO/Ag hibrit nanoakışkanı 0 ila 0,02 hacim oranlarında incelemişlerdir. Reynolds sayısı, nano parçacıkların hacim oranı ve mikro dönme faktörü gibi farklı parametrelerin akış alanı ve ısı transferi üzerindeki etkilerini incelenmişler, Reynolds sayısını arttırarak, hibrit nanoakışkanın sıcaklığının azaldığını ve sıcak duvarın yakınındaki mikro dönme parametresinin azaldığını fakat geçirgen duvarın yakınındaki arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, nanoakışkan yerine hibrit nanoakışkan kullanıldığında, özellikle yüksek Reynolds sayılarında ve nano parçacıkların yüksek hacim oranında ısı transferi artış göstermiştir. Esfe ve ark. [154], eşit hacim oranlarında farklı parçacık çaplarında su bazlı MgO (40 nm) ve Ag (25 nm) içeren hibrit nanoakışkanı farklı %0-%2 hacim oranı aralığında akışkanın ısı iletkenliği ve viskozitesini yeni korelasyonlarla incelemişlerdir. Nanoakışkanların ısı iletkenliği ve dinamik viskozitesi için mevcut birkaç teorik ve ampirik korelasyonun tahmin edilen değerlerini deneysel verilerle karşılaştırarak incelemişlerdir. Sonuçlar yeni geliştirilen korelasyonların iyi doğrulukta olduğu yönündedir. Başka bir çalışmada Uysal ve Korkmaz [155], dikdörtgen mini kanaldan su bazlı MgO/Ag hibrit nanoakışkanın konvektif ısı transferini ve entropi üretimini sayısal olarak incelemişlerdir. Hibrit nanoakışkanı 0,005 ve 0,02 hacim oranlarında ve 200 ila 2000 arası Reynolds sayısında değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak Reynolds sayısı 2000 ve MgO/Ag hibrit nanoakışkanın hacim oranı 0,02 alındığında konvektif ısı transfer katsayısının saf sudan %21,29 daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Selimefendigil ve Chamkha [156], yaptıkları çalışmada, gözenekli bir tabaka içeren üçgen şekilli bölümlenmiş bir boşluktaki su bazlı Ag/MgO hibrit nanoakışkanın manyetohidrodinamik karışık konvektif akışını incelemişlerdir. Çalışmaları, Richardson sayısı (0,01 ile 100 arasında), Hartmann numarası (0 ile 60 arasında), manyetik alan eğim açısı (0 ile 90 arasında), Darcy numarası (10^{-4} ile 5×10^{-2} arasında) gibi ilgili parametrelerin çeşitli etkileri, sıvı akışı ve konvektif ısı transfer özellikleri üzerindeki üçgen gözenekli bölgenin tepe noktasının (0,2 ila 0,8 H arasında) ve hibrit nanoparçacık katı hacim fraksiyonunun (ϕ 0 ile 0,01 arasında, ϕ 2 0 ile 0,01 arasında) konumunu kapsamıştır. Gözenekli ortamın yeri değiştirilerek ortalama Nusselt sayısında önemli değişiklikler elde etmişlerdir. Üçgen şekilli gözenekli bileşik, konvektif ısı transfer kontrolü için mükemmel bir alternatif olmuştur. Selimefendigil ve Öztıp [157], üç boyutlu T-şekilli havalandırılmalı bir boşlukta su bazlı Ag/MgO hibrit nanoakışkanın, bir iç döner koninin ve manyetik

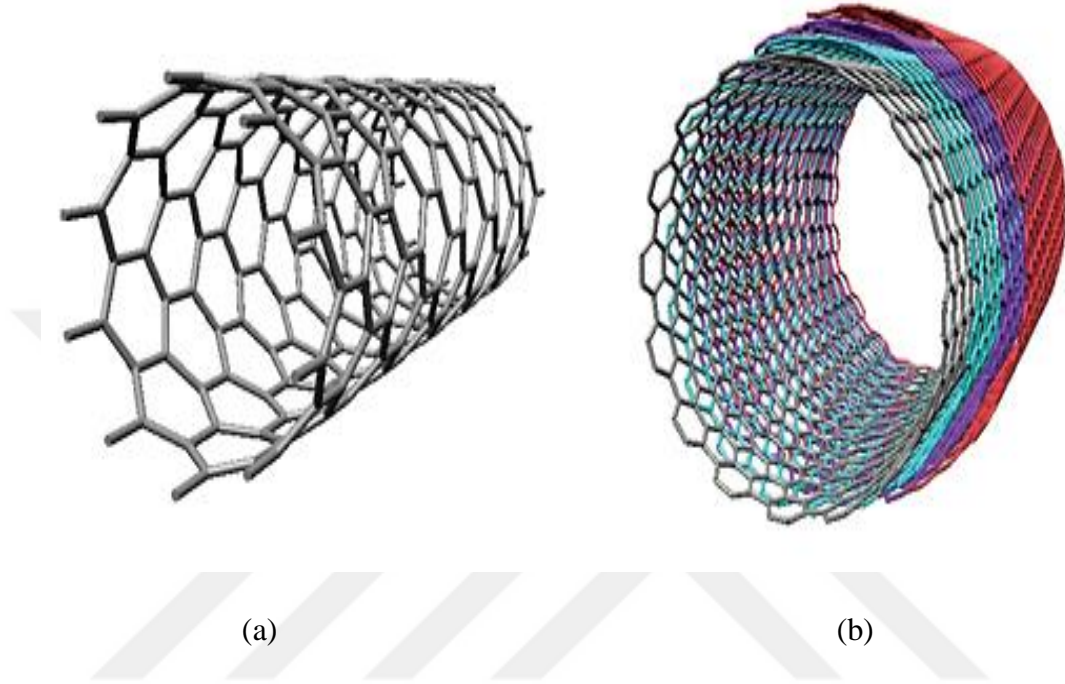
alanın etkileri altında birden fazla port ile zorlanmış konveksiyonunu incelemişlerdir. Analizleri, Reynolds sayısı (100 ile 1000 arasında), Hartmann numarası (0 ile 60 arasında), döner koninin açısal hızı (-200 rad/s ile 0 arasında), koninin tabanındaki dairesel silindirlerin en boy oranı (0,5 ve 2 arasında) ve hibrid nanoakışkanın hacim oranını (ϕ_1 , 0 ila 0,01 arasında, ϕ_2 , 0 ila 0,01 arasında) kapsamıştır. Ortalama ısı transfer oranının yüksek Reynolds sayısı, Hartmann sayısı belirtilen bir değerin üstünde, koninin açısal dönüş hızı, koninin l'in üzerindeki değerler için en-boy oranı ve hibrit parçacıkların katı nanoparçacık hacim oranları ile arttığı gözlemlenmiştir.

Gümüş (Ag) ve magnezyum oksidin (MgO) yüksek ısı özelliklerinin bir araya gelmesiyle oluşan hibrit nanoakışkan ısı transfer performansını artırarak enerji uygulamalarında alternatif haline gelebilir. Bu çalışmada dikdörtgen bir kanal içerisinde sıcak ve soğuk akışkan olarak kullanılacak su bazlı MgO/Ag hibrit nanoakışkanın, modellenen TEJ verimine etkisi incelenecektir.

5.1.2. Su Bazlı Karbon Nanotüp (CNT) Nanoakışkan

Son yıllarda yapılan araştırmalar karbonun yüksek ısı iletkenlik kabiliyetine sahip olması ve karbon nanotüplerin özel geometrisi nedeniyle ısı transfer uygulamalarında önemli bir yer edineceğini ortaya koymuştur. Karbon nanotüpler (CNT), 1991 yılında Lijima tarafından karbon elektrotlarının boşaltılmasıyla keşfedilmiştir. Bu keşiften sonra CNT malzemelerinin özellikleri ve olası uygulamaları dikkat çekmektedir. Son derece yüksek direnç, iyi esneklik, burulma kapasitesi, yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olan CNT'ler ayrıca metal veya metal oksit parçacıklarla kıyaslandığında daha yüksek ısı iletkenliğiyle ön plana çıkmaktadır [158, 159]. CNT'ler, genellikle çapı birkaç nanometre olan ve uzunlukları birkaç mikrometreden fazla olmayan tek duvarlı (SWCNT) veya çok duvarlı (MWCNT) silindirik yapılardır dolayısıyla yüksek en boy oranlarına sahip malzemeler arasında yer alır. SWCNT, silindir şeklinde tek bir grafen tabakadan oluşurken MWCNT, merkezde bulunan içi boş çekirdek etrafında birkaç eş merkezli grafen silindirden oluşur bu tüpler zayıf Van der Waals kuvvetleriyle birbirine bağlar [160]. Şekil 5.7 SWCNT ve MWCNT'nin yapısal özelliği belirtmektedir. Karbon doğada her yerde bulunmasına rağmen, CNT'ler belirli işlemlerle istenilen forma dönüştürülür. Ark deşarjı, lazer ablasyonu, kimyasal buhar birikimi (CVD), difüzyon ve önceden

karıştırılmış alev yöntemleri, SWCNT ve MWCNT için başlıca sentez yöntemleridir [161].



Şekil 5.7. Karbon nanotüplerin yapısal özelliği (a) SWCNT (b) MWCNT [162]

Oluşturulan MWCNT 3000 W/mK ve SWCNT 2000 W/mK üzerinde ısı iletkenliğe sahiptir ve yapılan deneyler CNT'nin genellikle 2000-6000 arasında değişen ultra yüksek ısı iletkenlikte olduğunu belirtir. Bu özellik ısı transfer uygulamalarında CNT içerikli nanoakışkanları potansiyel haline getirir. Diğer nanoakışkanlarda olduğu gibi CNT nanoakışkanında da hacim oranı, parçacık boyutu ve şekli, nanoakışkan sıcaklığı gibi faktörler ısı performansını etkiler. Ayrıca MWCNT'lerin, karbon nanotüpleri arasındaki etkileşimler kümelenme etkisi ile nanoakışkanların viskozitesini etkileyebileceği bildirilmiştir. CNT içeren nanoakışkanlar incelendiğinde bu parçacıkların yüksek ısı iletkenliği, düşük hacim oranında bile akışkanın ısı iletkenliğinde ciddi bir artışa neden olduğu görülmüştür. Esfe ve ark. [163], su bazlı MWCNT nanoakışkanın ısı iletkenliğini ve viskozitesini %0,05 hacim oranında ve 45°C'de suyla kıyasladıklarında bu değerler sırasıyla %36 ve %5,5'lik bir artış göstermiştir. Xing ve ark. [164], %0,005 ila 0,48 hacim oranında ve 10 ila 60°C aralığında CNT nanoakışkanı ısı iletkenliğini incelemişler ve elde ettikleri sonuçlar

ısı iletkenliğin, en boy oranına, konsantrasyona ve sıcaklığa büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Selimefendigil [165], i eliptik bir engele sahip tek ve çok duvarlı karbon nanotüp-su nanoakışkan dolgululu kapaklı boşlukta sayısal analiz gerçekleştirmiştir. Sayısal analiz, tekli ve çok duvarlı karbon nanotüpler su nanofluidi için çeşitli Richardson sayıları (0,05 ile 50 arasında) ve çeşitli katı parçacık hacim oranını (0 ile 0,06 arasında) kapsamıştır. Ortalama ısı transferi, saf su ile karşılaştırıldığında 0,06 katı hacim oranında tek duvarlı karbon nanotüp-su nanoakışkanı için yaklaşık %120,20 oranında artış göstermiştir. Selimefendigil ve Öztop [166], bölmenin farklı kısımlarında farklı sıvıları olan oluklu bölmeli bir boşlukta serbest konveksiyonu incelemişlerdir. Alanlardan birinde, eğimli düzgün manyetik alana sahip karbon nanotüp (CNT) -su nanoakışkanı göz önünde bulundurmuşlardır. Rayleigh sayısı (10^4 ile 10^6 arasında), Hartmann numarası (0 ile 50 arasında), manyetik eğim açısı (0° ile 90° arasında), katı parçacık hacmi oranı (0 ile 0,03 arasında) mevcut termal konfigürasyonun ilgili parametrelerinin çeşitli değerleri üçgen dalgaların sayısı (1 ile 40 arasında), üçgen dalgaların yüksekliği ($0,01H$ ile $0,2H$ arasında) ve termal iletkenlik oranı (0,1 ile 100 arasında) ve hidro-termal davranış üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. CNT'lerle Nusselt sayısında önemli iyileşmeler elde etmişlerdir. Ortalama ısı transferi, Hartmann sayısının daha yüksek değerleri için azalmış, ancak manyetik eğim açısı değiştikçe biraz değişim göstermiştir. Hem su hem de nanoakışkan için üçgen dalgaların en yüksek sayı ve yükseklik değerleri için %32 ve %27 olan ortalama ısı transferi azalmıştır.

6. COMSOL MULTIPHYSICS' DE NANOAKIŞKAN KULLANIMININ TERMOELEKTRİK JENERATÖR (TEJ) VERİMİNE ETKİ ANALİZİ

6.1. Cmsol Multiphysics

Cmsol Multiphysics, her türlü bilimsel ve mühendislik problemlerini modellemek ve çözmek için güçlü bir etkileşimli ortam sağlar. Yazılım Model Builder ile modele genel bakış ve tüm işlemlere erişilebilecek olanak sağlar ayrıca Cmsol Multiphysics ile bir tür fizik için konvansiyonel modelleri, birleştirilmiş fizik olaylarını çözen ve aynı anda yapan multifizik modellere kolayca genişletebilir. Bu işlemlerin yapılması derinlemesine matematik veya sayısal analiz bilgisi gerektirmez. Yerleşik fizik ara birimlerini ve malzeme özellikleri için gelişmiş desteği kullanarak, temel denklemleri tanımlamak yerine ilgili fiziksel miktarları (malzeme özellikleri, yükler, kısıtlamalar, kaynaklar ve akışlar gibi) tanımlayarak modeller oluşturmak mümkündür. Bu değişkenler, ifadeleri veya sayıları her zaman doğrudan hesaplama ve gözetleme açısından bağımsız olarak katı ve akışkan etki alanlarına, sınırlara, kenarlara ve noktalara uygulayabilir. Cmsol Multiphysics daha sonra dahili olarak tüm modeli temsil eden bir dizi denklemleri derler. Cmsol fizik ara yüzlerini kullanarak durağan ve zamana bağlı (geçici) çalışmalar, doğrusal ve doğrusal olmayan çalışmalar, öz frekans, mod ve frekans tepki çalışmaları gibi çeşitli çalışmalar yapılabilir. Modelleri çözerken, Cmsol Multiphysics kanıtlanmış sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanır. Yazılım, çeşitli sayısal çözümler kullanarak sonlu eleman analizini uyarlamalı ağ (seçildiyse) ve hata kontrolü ile birlikte yürütür. Çalışmalar çok işlemcili sistemleri ve küme hesaplamayı kullanabilir ve toplu işleri ve parametrik taramaları çalıştırabilir. Geometri, ağ, etüdler ve çözümler ayarlarını, görüntüleme ve sonuç sunumunu oluşturan tüm adımları kaydetmek için diziler oluşturur. Bu nedenle, modelin herhangi bir parçasını parametrelendirmek kolaydır: Model ağacındaki bir düğümü değiştirilip ve diziler yeniden çalıştırılırsa program, modeldeki diğer tüm bilgileri, verileri hatırlar ve yeniden uygular. Kısmi diferansiyel denklemler (PDE'ler) bilim yasalarının temelini oluşturur ve çok çeşitli bilimsel ve mühendislik olaylarının modellenmesi için temel oluşturur. Cmsol Multiphysics'in birçok uygulama alanında kullanabilir. Temel konfigürasyonunda Cmsol Multiphysics, birçok uygulama alanı için modelleme ve analiz gücü sunar. Birkaç kilit uygulama alanı için isteğe bağlı modüller vardır. Bu uygulamaya özel modüller, model oluşturmayı ve analiz etmeyi basitleştiren belirli bir disipline özgü terminoloji ve çözüm yöntemleri kullanır. Modüller ayrıca, ürünün

uygulama alanlarında kullanımını gösteren örnek modellere sahip kapsamlı model kütüphaneleri içerir. İsteğe bağlı modüller belirli uygulama alanları için optimize edilmiştir ve disiplin standart terminolojisi ve fizik ara yüzleri sunmaktadır. Aşağıda Comsol Multiphysics’de yer alan bazı temel problemlerin çözümünde kullanılan ana fizik ara yüzleri belirtilmiştir:

- AC/DC (elektrik akımı)
- Yarıiletkenler
- Plazma
- Isı transferi (katı ve sıvı)
- Akustik
- Akışkan davranışı
- Yakıt pilleri
- Kimyasal reaksiyonlar
- Elektrokimya
- Optik
- Yapısal mekanik

Comsol Multiphysics mühendislik, üretim ve bilimsel araştırmaların tüm alanlarında tasarımların, cihazların ve süreçlerin modellenmesi için genel amaçlı bir simülasyon yazılımıdır. Comsol Multiphysics mühendislik simülasyon yazılım araçları geometri tanımları, ağ örme, fizik ayarları, çözüm ve sonuçların görüntülenmesi gibi tüm modelleme adımlarını bütünleşik olarak sunar. Model oluşturma süreci önceden tanımlı fizik ara yüzleri sayesinde hızlıdır ve akış problemlerinden ısı taşınımına, yapısal mekanikten elektromanyetik analizlere kadar geniş bir kapsama sahiptir. Malzeme özellikleri, kaynak terimler ve sınır şartları alan değişkenlerinin keyfi fonksiyonları olarak atanabilir. Oluşturulan projeler için çoklu fizik modellemeyi kullanmanın yanı sıra, modelleri diğer tasarım ekipleri, üretim departmanları, test laboratuvarları, müşteriler ve daha fazlası için kullanmak üzere simülasyon uygulamalarına ve dijital çiftlere dönüştürülebilir. Platform ürünü kendi başına kullanılabilir veya elektromanyetik, yapısal mekanik, akustik, sıvı akışı, ısı transferi ve kimya mühendisliğini simüle etmek için herhangi bir ek modül kombinasyonu işlevsellik ile genişletilebilir.

6.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), ilk kez 1950'li yıllarda uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiştir. Son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisiyle mühendislik problemlerinin çözümünde de yaygın olarak kullanılmaya başlayan sayısal bir çözüm tekniğidir. Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık bir problemin basit denklemler kullanarak modellemek için daha küçük ve basit parçalara bölünmesi esasına dayanır. Daha sonra bu basit denklemler tüm problemi modellemek için büyük bir sisteme bağlanır. FEM, bir çözümü tahmin etmek için varyasyonel yöntemler kullanır. Bu yöntemler, genellikle bilinmeyen büyüklüklerin sistem içinde belirli ayrık noktadaki yaklaşık değerlerinin tahmini bir değerinin bulunmasını sağlar. Sonlu elemanlar üzerindeki fiziksel alanların parça bazında yaklaşımı, basit yaklaşım fonksiyonlarının varlığında bile iyi bir hassasiyet sağlar. FEM'de yapılan bu işlemlerle belirli adımlarla gerçekleşir. Sonlu elemanlar yönteminin ana adımları şu şekildedir:

- İlk adım, bir çözüm bölgesini sonlu elemanlara bölmektir. (Ayrıklaştırma)
- Her eleman için fiziksel büyüklüklerin davranışları tanımlanır. Farklı yaklaşımlar kullanılabilir, en uygun olanları varyasyonel yaklaşımlardır.
- Bilinmeyen fonksiyonun düğüm değerlerini diğer parametrelerle ilişkilendiren sonlu elemanlar için matris denklemi oluşturulur.
- Aranılan fonksiyonun düğüm noktalarındaki değerleri, çözümün bir sonucu olarak üretilir. Seçilen elemanların istenilen değerleri bulunur. Ayrıklaştırma için kullanılan tüm öğelerde yerel eleman denklemleri birleştirilir.
- Denklem sistemi çözülür. Doğrudan ve yinelemeli yöntemler çözüm için kullanılabilir. Aranılan fonksiyonun düğüm değerleri, çözümün bir sonucu olarak üretilir.

Modelin FEM'de analiz ile elde edilen sonuçlar iyice incelenmeli, hata payı olup olmadığı gerçek verilerle kıyaslanarak doğru ve geçerli sonucu ulaşılmalıdır. Sayısal analiz yönteminde ayrıklaştırma ile küçük parçalara bölünen model daha sonra bir araya gelerek ana yapıyı oluştururlar. Yöntem tüm modeli bir defada çözmek yerine, ayrıklaştırılan parçalarla çözümü yapıp, küçük parçaların birleştirilmesiyle ana bölgeye ait çözüm oluşturulur. Küçük parçalar için gerçekleşen yaklaşımlar bu şekilde bölgenin tamamı için geçerli olacaktır. Sonlu elemanlar yönteminde tek boyutlu (çizgi), iki boyutlu (düzlem) ya da üç boyutlu (katı) olarak modelleme yapılabilir. FEM

birçok avantaja sahiptir. Karmaşık geometri ve malzeme özelliklerine sahip modelin incelenmesine olanak sağlar. Çözümün alt bölgelere ayrılabilir olması doğruluk payını yüksektir ve bazı alt bölgelerde gerektiğinde hassas hesaplamalar yapılabilir. Sınır şartları, sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra ve basitçe denklemlere dahil edilebilir. Model hem fiziksel hem de matematiksel olarak değerlendirilebilir. FEM avantajlarıyla öne çıkmasına rağmen bazı dezavantajlara sahiptir. Birçok mühendislik uygulamalarında kullanılmasına rağmen uygulamada zorluklar yaşanabilir. Malzeme özellikleri iyi tanımlanmadığında sistemde sorun yaşanabilir. Sonlu elemanlar yöntemi günümüzde, mekanik (statik, dinamik) problemlerin çözümünde, hemen hemen tüm mühendislik alanlarında, medikal alanda, akışkanlar mekaniği, gerilme analizi, ısı transferi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

6.3. Modelin Comsol Multiphysics'de Analizi

Bu bölümde daha önce çok sayıda araştırmaya konu olmuş TEJ verimi incelenmiştir. Çalışmada nanoakışkan kullanımının TEJ verimine etkisi araştırılmıştır. Oluşturulan model, iki kanal arasına yerleştirilen TEJ'den oluşur ve kanallar içinden su, su bazlı MgO/Ag hibrit nanoakışkan ve CNT nanoakışkan geçirilerek TEJ verimine etkisi sayısal olarak analiz edilir. Akışkanların farklı Reynolds sayılarındaki ısı transfer davranışlarındaki değişikliğin TEJ verimi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca nanoakışkanların farklı hacim oranlarına sahip olması durumunda TEJ verimi üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir. Analizler için Comsol Multiphysics FEM'den (Sonlu Elemanlar Yöntemi) yararlanılmıştır. Comsol Multiphysics'de TEJ sistemin, FEM modellemesi aşağıdaki aşamalarla oluşturulmuştur.

- İlk olarak TEJ sisteminin üç boyutlu modellenmesi yapılmıştır.
- Modelin sayısal analizi için gerekli denklemler oluşturulmuştur.
- TEJ sisteminin sınır şartları belirlenmiştir.
- Tasarlanan model mesh işlemiyle küçük parçalara ayrılmıştır.
- Sistemin simülasyonu oluşturulmuş ve sayısal analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

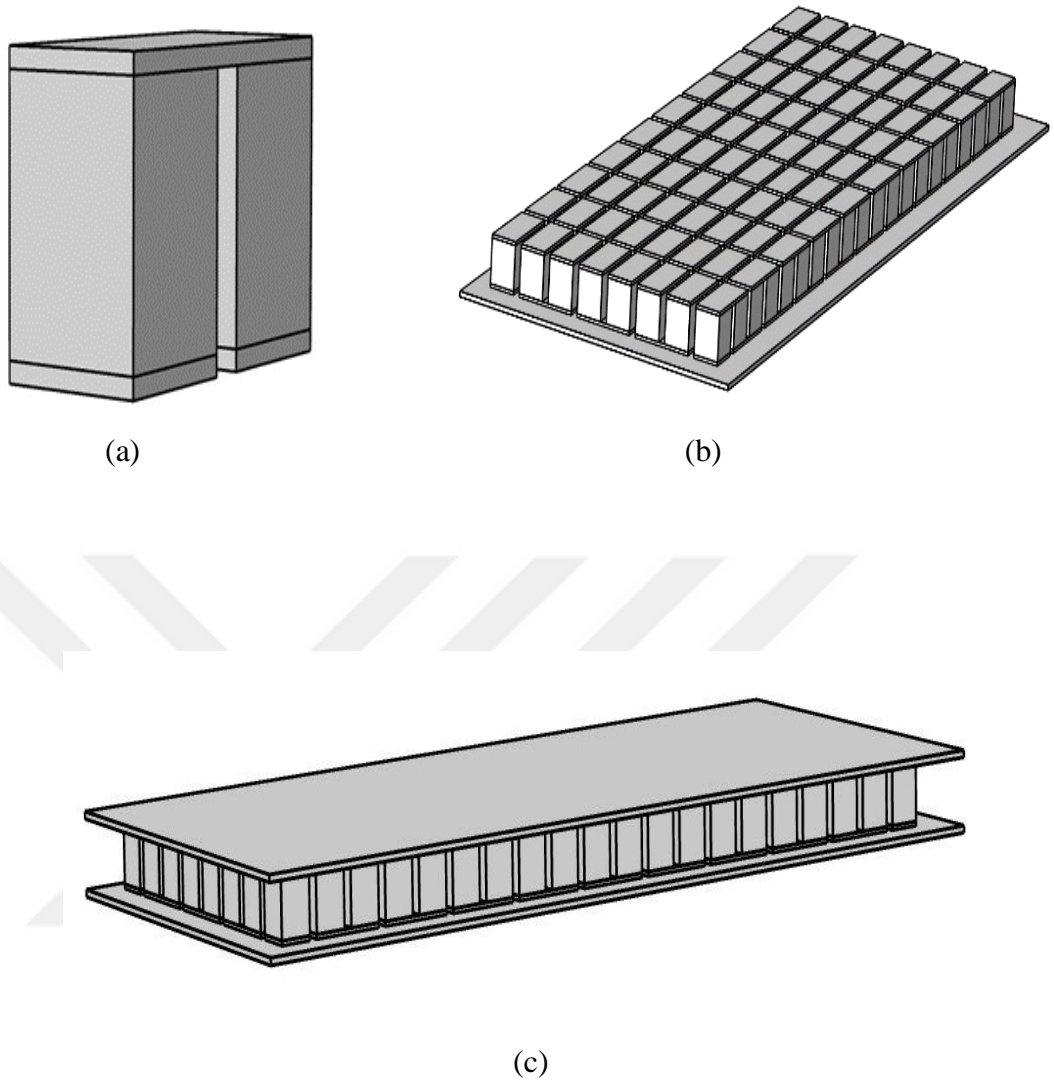
6.4. Termoelektrik Jeneratör (TEJ) Sisteminin Tasarımı

Isı ve elektrik enerjisi arasındaki tek taraflı dönüşümünü sağlayan TEJ'lerin tasarımı bu sistemlerin performansı üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. TEJ tasarımında malzeme boyutları ve kullanılan malzeme çeşitleri TEJ cihazlarının verimini etkilemektedir. TEJ'in temelini TEM'ler oluşturur. TEM'ler, elektriğin üretilmesini sağlayan p ve n tipi yarıiletken ayaklardan, bu ayaklar arasındaki elektriksel bağlantıyı sağlayan iletken malzemeden ve elektriksel yalıtımı sağlayan seramik tabakadan oluşur. Daha önce birçok farklı şekil ile tasarlanmış TE ayaklar bu çalışmada kara prizma şeklinde tasarlanmıştır. Bu modelde kare plazma şeklinde tasarlanmıştır. TEJ'i oluşturan malzeme boyutları Tablo 6.1'de belirtilmiştir. Bu boyutlar kullanılarak Comsol Multiphysics Geometri kısmında cihazın üç boyutlu modellenmesi oluşturulur.

Tablo 6.1. Termoelektrik jeneratör sistemini oluşturan malzemelerin boyutu

Malzeme	Boyut
p/n tipi ayakların genişliği	2 mm
p/n tipi ayakların uzunluğu	2 mm
p/n tipi ayakların yüksekliği	2.5 mm
Elektrot kalınlığı	0.2 mm
Elektrot genişliği	4.5 mm
Elektrot uzunluğu	2 mm
Seramik kalınlığı	0.3 mm
Seramik genişliği	54 mm
Seramik uzunluğu	23 mm

Yarıiletken ayaklar daha yüksek voltaj elde etmek veya sürdürmek için elektriksel olarak seri bağlanır ve termal olarak paralel bağlanır. TEM'i oluşturmak için ilk olarak Comsol Multiphysics'de p ve n tipi TE ayaklar Şekil 6.1.a' daki gibi elektrot yardımıyla birbirine bağlanarak modülün elektriksel ve termal ilişkisi sağlanmıştır. TEJ' ü oluşturmak için toplamda 80 adet modül birbirine Şekil 6.1.b'deki gibi sıralı bir şekilde bağlanmıştır. Daha sonra TEM'ler, harici yüzeylerden elektriksel olarak yalıtılmak için alt ve üst seramik tabakalar arasına yerleştirilerek TEJ tasarımı tamamlanır (Şekil 6.1.c).



Şekil 6.1. Comsol Multiphysics’de modellenmiş TEJ (a) termoelement (b) TEM iç görünümü (c) TEJ

TEJ için malzeme seçilirken cihazın performansını etkileyen termofiziksel özellikler göz önünde bulundurulur. Ayaklar için kullanılacak yarıiletken malzemenin ZT değeri TEJ veriminde önemli bir faktördür. Bu yüzden kullanılan yarıiletken malzemenin ısı iletkenliği, elektriksel iletkenliği ve Seebeck katsayısı gibi ZT değerini etkileyen özellikleri büyük önem taşır. Bu faktörler göz önünde bulundurulduğunda termoelektrik ayaklar için malzeme seçiminde diğer yarıiletken malzemelere göre daha iyi ZT değerine sahip olan bizmut tellür (Bi_2Te_3) seçilmiştir. Geleneksel yarıiletken malzeme olan Bi_2Te_3 , düşük sıcaklık dönüşümü için en uygun termoelektrik malzemedir. Yarıiletken ayaklar arasındaki elektriksel bağlantıyı sağlayan elektrot için iyi bir iletken malzeme seçilmelidir. Bu yüzden elektrotlar için

yüksek elektrik iletkenliğine sahip bakır (Cu) kullanılmıştır. Seramik tabaka için seçilecek malzeme düşük elektrik iletkenliğine ve yüksek ısı iletkenliğine sahip olmalıdır. Bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda seramik tabaka için alüminyum oksit (Al_2O_3) kullanılmıştır. TEJ modülünü oluşturan malzemelerin termofiziksel özellikleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Termoelektrik jeneratör sistemini oluşturan katı malzemelerin özellikleri

Malzeme özellikleri	Sembol	p tipi Bi_2Te_3	n tipi Bi_2Te_3	Cu	Al_2O_3
Isıl iletkenlik	k (W/K.m)	1.6	1.6	400	27
Seebeck katsayısı	α (V/K)	2.1×10^{-4}	-2.1×10^{-4}	6.5×10^{-6}	–
Elektriksel iletkenlik	σ (S/m)	0.8×10^5	0.8×10^5	5.9×10^8	–
Yoğunluk	ρ (kg/m ³)	7700	7700	8960	3900
Isıl iletkenlik	C_p (J/kg.K)	154	154	385	900

TEJ’i oluşturan, TEM sayısı, modülü oluşturan malzemelerin boyutu ve termofiziksel özellikleri TEJ performansını etkileyen parametreler arasında yer alır. Performans analizi için kullanılan değerlerden biri olan iç direnç bu özelliklerle bulunabilir. TE modülde malzemelerin yükseklikleri (h), kesit alanları (A) ve elektriksel dirençleri (γ) yardımıyla iç direnç değeri hesaplanabilir. Tek modül kullandığında iç direnç değeri Denklem 5.1 ile ifade edilir.

$$R_{int} = \frac{h_p \gamma_p}{A_p} + \frac{h_n \gamma_n}{A_n} + 2 \frac{h_c \gamma_c}{A_c} \quad 6.1$$

Tasarlanan modelde termoelektrik ayaklar aynı boyutlara sahiptir bu yüzden p ve n tipi ayakların yüksekliği ve kesit alanı eşittir. Aynı zamanda aynı malzeme kullanılarak oluşturulan p ve n tipi ayakların elektriksel direnç değerleri de birbirine eşit olur. Bu durumda göz önüne alındığında aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$A_p = A_n = A$$

$$h_p = h_n = h$$

$$\gamma_p = \gamma_n = \gamma$$

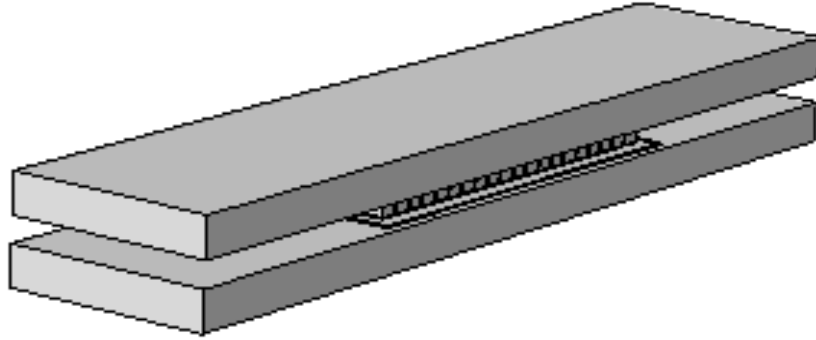
Bağıntılar baz alınarak oluşturulan termoelektrik modülün iç direnç değeri denklem 6.2 ile ifade edilir.

$$R_{\text{int}} = 2 \frac{h \gamma}{A} + 2 \frac{h_c \gamma_c}{A_c} \quad 6.2$$

TEJ'in toplam iç direncinin hesaplanmasında termoelektrik ayak boyutu ve kullanılan malzeme özelliklerinin yanısıra modül sayısı da etkilidir. Yapılan çalışmada tasarlanan TEJ toplamda 80 adet TEM'den oluşmuştur. Bu durumda TEJ'in toplam iç direnci denklem 6.3 yardımıyla hesaplanır.

$$R_{\text{int}} = 80. \left(2 \frac{h \gamma}{A} + 2 \frac{h_c \gamma_c}{A_c} \right) \quad 6.3$$

Tasarlanan TEJ Şekil 6.2 görüldüğü gibi iki dikdörtgen kanal arasında yerleştirilmiştir. Kanallar TEJ için ısı değiştirici görevindedir ve sıcaklık gradyanını kanal içinden geçen farklı sıcaklıktaki akışkanlar oluşturur. Kanalın boyutu 120 mm×26 mm×5.4 mm ve kanal kalınlığı ihmal edilmiştir.



Şekil 6.2. İki kanal arasında yerleştirilmiş termoelektrik jeneratör

Tasarlanan modelde, alt kanaldan soğuk, üst kanaldan sıcak akışkan geçecektir. Kanallar, akışkanların sıcaklığıyla birlikte farklı sıcaklıklara sahip olur ve sıcak ve soğuk taraf sıcaklıkları ile optimum ısı transfer yüzey alanı arasındaki ilişkiler, TEM'lerin hem sıcak hem de soğuk taraflarına diferansiyel bir alan üzerine enerji dengeleri uygulanarak analiz edilir. Bu doğrultuda akışkan özellikleri büyük önem teşkil eder. Akışkan olarak su, su bazlı MgO/Ag ve CNT nanoakışkanı kullanılmıştır. Akışkanların ısı transfer özellikleri modelin incelemesinde önemli faktörlerden biridir. Akışkanın ısı transferi özelliklerinin belirlenmesi veya hızlarının hesaplanması için termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Suyun termofiziksel özellikleri

Comsol Multiphysics materyal kısmında mevcuttur ve seçiminde özellikleri ısı transfer ve akış ara yüzlerinde otomatik olarak ayarlanır. Nanoakışkanların ısı kapasitesi, termal iletkenlik, yoğunluk gibi termofiziksel özellikleri denklemler yardımıyla hesaplanır. Tablo 6.3 nanoakışkanın oluşumunu sağlayan katı parçacıkların ve suyun termofiziksel özellikleri belirtilmiştir.

Tablo 6.3. Su ve katı parçacıkların termofiziksel özellikleri [167, 168]

Malzeme özellikleri	Sembol	Su	MgO	Ag	SWCNT	MWCNT
Isıl iletkenlik	k (W/K.m)	0.613	429	45	2600	1600
Isı kapasitesi	C_p (J/kg.K)	4179	955	235	425	796
Yoğunluk	ρ (kg/m ³)	997.1	10.500	3560	6600	3000
Dinamik viskozite	μ (kg/m.s)	8.98×10^{-4}	–	–	–	–

Tablo 6.3 belirtilen değerlerden faydalanılarak, nanoakışkanların termofiziksel özellikleri hesaplanır. k_1, k_2, k_f sırasıyla Ag, MgO ve suyun ısı iletkenliği olmak üzere hibrid nanoakışkanın ısı iletkenliği denklem 6.4 ile hesaplanır.

$$k_{hnf} = \left(\frac{0.1747 \times 10^5 + \emptyset}{0.1747 \times 10^5 - 0.1498 \times 10^6 \emptyset + 0.1117 \times 10^7 \emptyset^2 + 0.1997 \times 10^8 \times \emptyset^3} \right) k_f \quad 6.4$$

k_{hnf} hibrit nanoakışkanın ısı iletkenliğini ifade eder. \emptyset_1 ve \emptyset_2 katı parçacıkların hacim oranlarıdır. Bu çalışmada Ag ve MgO katı parçacıkları eşit hacim oranlarına sahiptir. \emptyset , toplam hacim oranını ifade eder. Dinamik viskozite denklem 6.5 ile ifade edilir.

$$\mu_{hnf} = (1 + 32.795\emptyset - 7214\emptyset^2 + 714600\emptyset^3 - 0.1941 \times 10^8 \emptyset^4) \mu_f \quad 6.5$$

μ_f , suyun dinamik viskozitesi ve μ_{hnf} nanoakışkanın dinamik viskozitesidir. Hibrit nanoakışkanın yoğunluk ve özgül ısı kapasitesi, katı parçacıkların ve temel sıvının bu özellikleri ile birlikte katı parçacıkların hacim oranları yardımıyla bulunur. Denklem 6.6, nanoakışkanın yoğunluğunu ve denklem 6.7, nanoakışkanın özgül ısı kapasitesini belirler. Nanoakışkan yoğunluğunun tahmini için denklem, Pak ve Cho [169] tarafından verilen kütle dengesi tanımına göre yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$\rho_{hnf} = (1 - \emptyset)\rho_f + (1 - \emptyset_1) \rho_1 + (1 - \emptyset_2) \rho_2 \quad 6.6$$

$$(\rho C_p)_{hnf} = (1 - \emptyset) \rho_f (C_p)_f + (1 - \emptyset_1) \rho_1 C_{p1} + (1 - \emptyset_2) \rho_2 C_{p2} \quad 6.7$$

CNT nanoakışkanın ısı iletkenlik tahmini için kullanılan model denklem 6.8’de gösterildiği gibidir [170, 171].

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{(1-\phi_{CNT})+2\phi_{CNT} \frac{k_{CNT}}{k_{CNT}-k_f} \ln \frac{k_{CNT}+k_f}{2k_f}}{(1-\phi_{CNT})+2\phi_{CNT} \frac{k_f}{k_{CNT}-k_f} \ln \frac{k_{CNT}+k_{CNT}}{2k_f}} \quad 6.8$$

Denklem 6.9 CNT nanoakışkanın yoğunluğunun ve denklem 6.10 özgül ısı kapasitesinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$\rho_{nf} = (1-\phi_{CNT}) \rho_f + \phi_{CNT} \rho_{CNT} \quad 6.9$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi_{CNT}) \rho_f (C_p)_f + \phi_{CNT} (\rho C_p)_{CNT} \quad 6.10$$

Brinkman modeli (Denklem 6.11) yardımıyla CNT nanoakışkanın dinamik viskozite değeri hesaplanabilir.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad 6.11$$

Denklem 6.12 ile ifade edilen, cihaz tarafından üretilen gücün sıcak akışkan tarafından oluşturulan, absorbe edilen ısı miktarına oranı TEJ verimini elde etmemizi sağlar [172].

$$\eta = \frac{P}{Q_h} \quad 6.12$$

Sıcak akışkanın oluşturduğu ısı miktarı ise denklem 6.13 ile hesaplanır [173].

$$Q_h = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad 6.13$$

\dot{m} kütle akışı olmak üzere, akış kanalının geometrik boyutları ve akışkan özellikleri ile birlikte (Denklem 6.14), varsayılan ısı transfer katsayıları için akışkanın gerekli kütle akış hızları bulunabilir [174].

$$\dot{m} = \rho \cdot u \cdot A \quad 6.14$$

u akışkan hızı, A kanal alanını ifade eder ve Reynolds sayısı akışkanın ortalama hızını içerir. Denklem 6.15 Reynolds sayısını formülize ederken, absorbe edilen ısı miktarı için hesaplanan değerler yerine yazıldığında denklem 6.16 elde edilmiş olur.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \quad 6.15$$

$$Q_h = \rho \cdot u \cdot A \cdot C_p \cdot \Delta T \quad 6.16$$

TEJ verim değerinin hesaplanması için kullanılan tüm değerler kullanıldığında denklem 6.17 oluşur.

$$\eta = \frac{I^2 \cdot R_L}{\rho \cdot u \cdot A \cdot C_p \cdot \Delta T} \quad 6.17$$

6.5. Comsol Multiphysics Fizik Ara Yüzlerinde Gelişen Denklemler

TEJ'de enerji dönüşümleri için ısı iletim denklemi, sıcaklık dağılımı ve Seebeck denklemi, Seebeck etkisine dayanarak TE devredeki voltaj dağılımını yönetir. Bu denklemler Joule, Thomson ve Peltier etkisiyle birbirine bağlıdır. Birleştirilmiş TE modeli, birleşme ilişkileri kullanılarak termal alana dönüştürülür, bu da doğrusal olmayan iç ısı üretim terimlerini ve bağlantı noktalarında doğrusal olmayan kısıtlamaları içeren bir termal model ile sonuçlanır. Modelin sayısal analizi için Comsol Multiphysics'de seçilen Eşlenik Isı Transfer ve AC/DC fizik ara yüzleri içinde yer alan alt modüllerde oluşan denklemlerden faydalanılmıştır.

Eşlenik Isı Transfer modülü ısı transferi fizik ara yüzü ve akışkanın seçilen akış tipine göre Laminer akış fizik ara yüzünü içermektedir. Katı ve sıvı malzemenin ısı transfer denklemleri ve akışkanın denge denklemleri bu modülde otomatik olarak tanımlanır. Denklem 6.18 ve denklem 6.19 tanımlanan katı ve sıvı malzemelerin enerji korunum denklemlerini ifade eder. Katı malzemenin ısı transfer denklemi:

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad 6.18$$

Burada ρ katı malzemenin yoğunluğu, C_p sürekli stres altında özgül ısı kapasitesi, u öteleme hareketinin hız vektörü, ∇ değişimi veren skaler fonksiyon, T mutlak sıcaklık, q iletim yoluyla ısı akışı, Q ısı kaynağı ve Q_{ted} termoelastik sönümlemedir ve katılarda termoelastik etkileri açıklar. Sıvı malzemelerin ısı transferini denklem 6.19 belirler.

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_p + Q_{vd} \quad 6.19$$

ρ sıvı malzemenin yoğunluğu, u hız vektörü, T mutlak sıcaklık, C_p sabit basınçta özgül ısı kapasitesi, q iletim yoluyla ısı akışı, Q viskoz yayılım dışında ısı kaynaklarını ifade

eder. Q_p , basınç değişiklikleri ile yapılan iştir ve adyabatik sıkıştırma altında ısıtmanın yanı sıra bazı termoakustik etkilerin sonucudur. Q_{vd} , viskoz yayılımı ifade eder.

Oluşturulan modelde doğal taşınım ve iletim yoluyla ısı transferi gerçekleşmiştir. İletim, sıcaklık gradyanıyla orantılı ısı akısını ifade eder ve Fourier yasası ile matematiksel olarak tanımlanır. Taşınım, katı yüzey ile sıvı arasında sıvının hareketiyle ısının bir yerden başka bir yere aktarılmasıyla gerçekleşen ısı transferidir ve Newton'un soğutma kanunuyla tanımlanır. Isı iletim katsayısı k olmak üzere, iletim yoluyla gerçekleşen ısı akısı denklem 6.20'de belirtilmiştir.

$$q = -k \nabla T \quad 6.20$$

h taşınım ısı transfer katsayısı, A taşınımın gerçekleştiği yüzey alanı, T_s yüzey sıcaklığı, T_∞ serbest akışkan sıcaklığı olmak üzere denklem 6.21, taşınım yoluyla gerçekleşen ısı akısını belirtir.

$$Q = h.A.(T_s - T_\infty) \quad 6.21$$

Bir akış alanı, süreklilik denklemi, Navier-Stokes denklemleri ve toplam enerji denklemi tarafından tanımlanan kütle, momentum ve toplam enerjideki denge ile karakterize edilir. Laminar akış ara yüzü sıvı akışının hızını ve basınç alanını hesaplamak için kullanılır. Navier Stokes denklemleri sıvıların hareketini yönetir ve Newton'un sıvılar için ikinci hareket yasası olarak görülebilir. Sıkıştırılabilir bir Newton sıvısı durumunda momentum korunumu;

$$\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla [-p + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{1}] + \mathbf{F} \quad 6.22$$

Matematiksel model denklem 6.22'de u hız alanını verir, p basınç, T modellenmiş alandaki sıvının sıcaklığı, μ dinamik viskozite ve \mathbf{F} hacim kuvvetidir. Enerji denkleminde sağlanan ve bir akışkandaki konveksiyondan sorumlu hız alanının sürekliliği denklem 6.23 ile açıklanır.

$$\nabla (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad 6.23$$

Elektrik akımı fizik ara yüzü, TE yönetim denklemlerini çözmek için kullanılmıştır ve TE matematiksel model, Seebeck, Peltier, Thomson, Joule ısıtma etkisi ve Fourier yasasını içerir. TE etkiler enerji korunumu ve elektrik yükü sürekliliği olarak tanımlanabilir ve yük ile ısı arasındaki karşılıklı etkileşimi içerir.

Isı akış denklemi ve elektrik yükü sürekliliğinin birleşiminde TE etki uygulanması aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$\nabla \cdot J = Q_j \quad 6.24$$

Q_j , akım kaynağı sıfır kabul edilir. Elektromotor kuvvetler, voltaj farklılıklarının yokluğunda bile (veya tersi) akım üreterek Ohm yasasını değiştirebilir. Buna göre J , akım yoğunluğu denklem 6.25 ile hesaplanabilir.

$$J = \sigma E + J_e \quad 6.25$$

J_e , harici akım yoğunluğu;

$$J_e = -\sigma \alpha \nabla T \quad 6.26$$

σ elektrik iletkenliği ve E elektromanyetik alandır. Zamanla değişen manyetik alanın yokluğunda, E dönüşsüz hale gelir ve bir elektrik skaler potansiyelinden türetilir.

$$E = -\nabla V \quad 6.27$$

Denklemler düzenlendiğinde akım yoğunluğu (Denklem 6.28);

$$J = -\sigma (\nabla V + \alpha \nabla T) \quad 6.28$$

Manyetik alanının yokluğunda Seebeck, Peltier ve Thomson etkisinin elektriksel ve ısı alanları arasındaki bağlantı mekanizmalarını hesaba katan, tam manyetik alan modeli elektrik potansiyelleri ve sıcaklık için kararlı durum koşulları altında yönetim denklemleri üretilerek geliştirilebilir [175].

$$q = \Pi J \quad 6.29$$

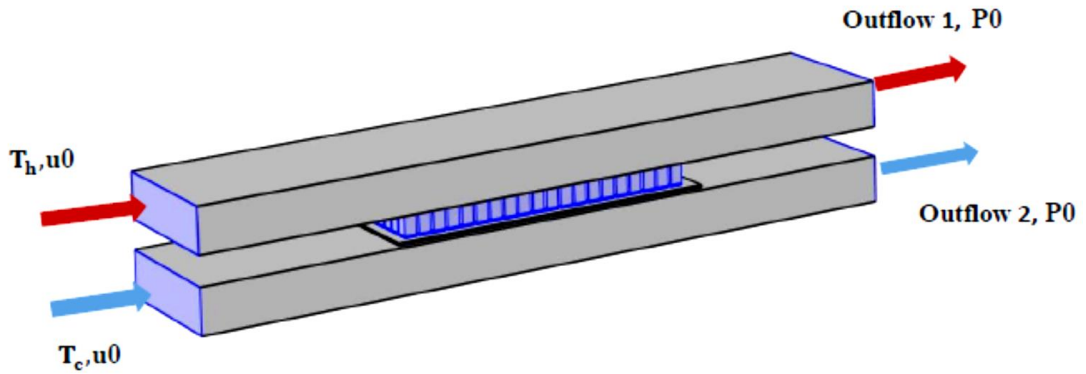
$$\Pi = \alpha T \quad 6.30$$

Π Peltier katsayısı ve q iletim yoluyla oluşan ısı akısıdır. Genişletilmiş Joule modeliyle oluşan katı alan için enerji korunumu denklem 6.31 ile ifade edilir.

$$\nabla (k \cdot \nabla T) + \frac{J^2}{\sigma} - T J \cdot \nabla \alpha = 0 \quad 6.31$$

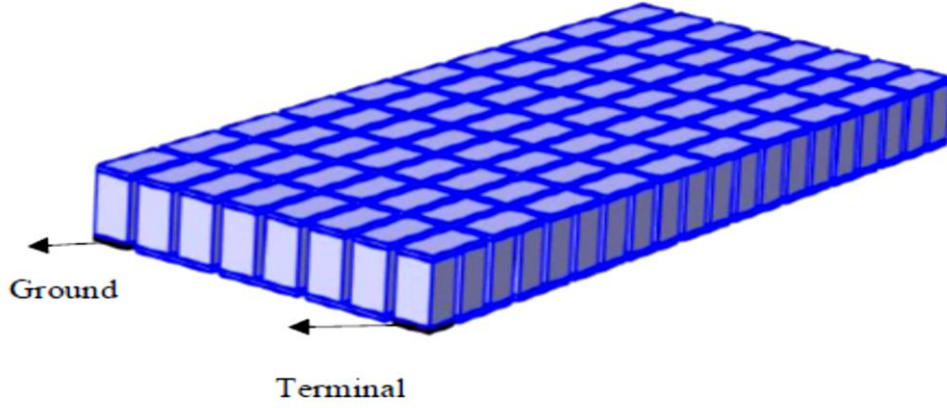
6.6. Tasarlanan Modelin Sınır Şartları

Oluşturulan modelde akışkanın kanallara giriş ve çıkış yüzeyleri belirlenir. Isı denklemi belirlenmiş sıcaklık ve belirlenmiş ısı akısı olarak iki temel sınır şartını kabul eder. $T = T_0$ bir sınırdaki belirlenen sıcaklıktır. Akışkanın kanallara giriş sıcaklığı sıcak akışkan için 323,15 K ve soğuk akışkan için 293,15 K olarak belirlenmiştir. Kanal içindeki akışkanların ısı enerjileri konveksiyon ve iletim ısı transferiyle taşınır. İçeriye doğru ısı akısı, q_0 , farklı ısı transferinden elde edilen katkıların toplamıdır ve $-n \cdot q = q_0$ olarak tarif edilir. n sınırdaki normal vektör, q iletim yoluyla ısı akısı vektörüdür. İçeri doğru ısı akısı q_0 , ısı yalıtımı gibi özel durumda ve çıkış yüzeylerinde sifira eşittir [176]. Katı modelin kanallara temas eden yüzeyleri hariç tüm yüzeylerinde ısı yalıtımı geçerlidir. Ortamla temas eden modelin tüm yüzeyleri için ısı akısı olarak doğal konveksiyon uygulanmıştır. Doğal konveksiyon için ısı akısı sınır şartı $q_0 = h (T_{ext} - T)$ olarak belirlenir. Akışkan laminar akış formunda olup, kanalların duvar kalınlıkları ihmal edilmiştir. Şekil 6.3 Eşlenik ısı transfer ara yüzeyinde belirlenen, akışkanın giriş ve çıkış yüzeyleri ve katı modelin ısı yalıtım yüzeyleri gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Isı transferi ve akışkan akışının gerçekleştiği ara yüzeylerdeki sınır şartları

Laminar akış için belirlenen yüzeylerde, akışkanın u_0 giriş hızı ve P_0 çıkış basıncı hesaplanmıştır. Akışkanın farklı Reynolds sayılarına ve sıcaklığa bağlı olarak değişen, dinamik viskozitesi ve yoğunluğu gibi termofiziksel özelliklerine göre giriş hızları ve çıkış basınçları hesaplanarak belirlenen yüzeylerde ayarlanır ve kanala giriş yapar. Elektriksel süreçlerin gerçekleştiği elektrik akımı ara yüzeyinde yalıtımın meydana geldiği yüzeyler Şekil 6.4’de gösterildiği gibidir.



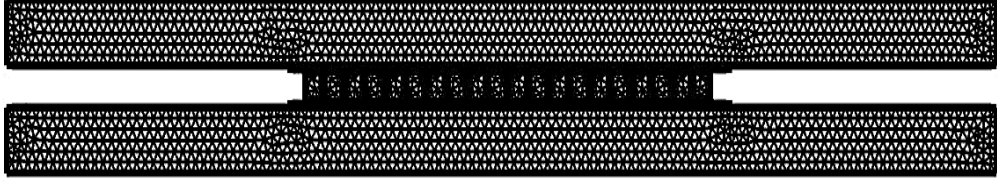
Şekil 6.4. Elektrik akımı fizik ara yüzünün sınır şartları

Elektrik yalıtımı sınır koşulu, sınıra hiçbir elektrik akımının girmediği anlamına gelir, $n \cdot J = 0$ olarak tanımlanır [176]. Bu denklem, iç sınırlarda, sınır boyunca hiçbir akımın akmayacağı ve elektrik potansiyelinin sınırlar boyunca süreksiz olduğu anlamına gelir. Elektrik yalıtımı seramik hariç katı modelin tüm yüzeylerinde geçerlidir. TEJ’de, ground sınırında elektrik potansiyeli sifıra eşittir ve terminalde akım sifıra eşittir.

6.7. Ağ Tabaka (Mesh İşlemi)

Sonlu elemanlar yönteminde modelin ağ tabakalarına (mesh) bölünmesi analiz için dikkat edilmesi bir husustur. Sonlu elemanlar ağı tipik olarak bir ön işlemci programı tarafından üretilir. Kafesin tanımı, temel olarak düğüm koordinatları ve eleman bağlanabilirlikleri olan birkaç diziden oluşur. Comsol Multihysics’de ağ tabaka işleminde modelin yüzey, kenar, köşe alanlarını dört yüzlü, altı yüzlü, prizma veya piramit ağ elemanlarına ayrıştırılabilir. Geometrideki sınırlar üçgen veya dörtgen şekilli sınır elemanlarını oluşturur. Alternatif olarak, kullanıcı kontrollü bir ağ kullanılabilir. Varsayılan değer, fizik tarafından kontrol edilen bir kafes kullanmaktır. Serbest ağ tabaka tüm boyutlarda mevcuttur ve topolojisine veya şekline bakılmaksızın tüm geometri türleri için kullanılabilir. Bir kafes tanımlanmadıysa veya oluşturulmadıysa, serbest ağ tabaka otomatik olarak yapılandırılmamış bir kafes oluşturur ve Comsol Multiphysics’de model oluşturucu bölümüne karşılık gelen bir düğüm ekler. Kafes elemanlarının sayısı, geometrinin şekli ve çeşitli ağ parametreleri ile belirlenir. Ağ tabaka dizilerindeki boyut ve dağıtım özelliklerine göre serbest ağ tabakada parametreler kontrol edilebilir. Bu çalışmada oluşturulan modelde

hesaplamalı alanın kafes dağılımı için free tetrahedral (Şekil 6.5) norm kullanılmış, analizler buna bağlı olarak gelişmiştir.



Şekil 6.5. Hesaplamalı alanın kafes dağılımı

Simülasyon analizi için, sonuçların mesh bağımsızlığı sağlanmıştır. Tablo 6.4, çeşitli kafes boyutları ve üç farklı Reynolds sayısı değeri için ağ bağımsızlık testi sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 6.4. Kafes bağımsızlık testi sonuçları: Üçte çeşitli Reynolds sayısı için ve çeşitli kafes boyutları için güç çıkış değerleri (% 2 katı hacim fraksiyonuna sahip CNT parçacıkları)

Kafes adı	Eleman sayısı	Re= 100	Re= 500	Re= 1500
G1 (coarser)	22986	0.196	0.318	0.494
G2 (coarse)	124007	0.221	0.370	0.500
G3 (normal)	308866	0.228	0.419	0.532
G4 (fine)	1145976	0.235	0.442	0.545
G5 (finest)	3458225	0.237	0.444	0.547

Kafes iyileştirme duvarların yakınında ve ara yüzlerde gerçekleştirilir. Takip eden hesaplamalar için 1145976 numaralı tetrahedral elemanlı G4 seçilmiştir. 32 parametrik çalışma kombinasyonu için hesaplama süresi (Reynolds sayısı için 7 değer ve katı hacim oranı için 5 değer) bir iş istasyonunda yaklaşık 12 saattir.

6.8. Modelin Simülasyonu ve Sayısal Analiz Sonuçları

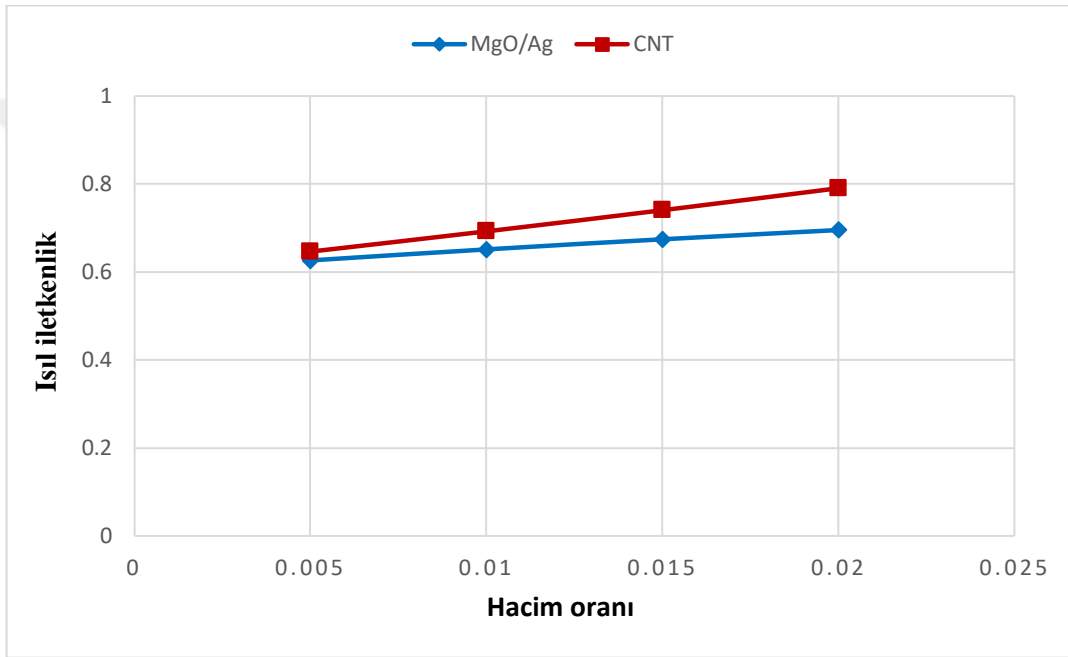
6.8.1. Çözücü

TEJ tasarımının analizi için Comsol Multiphysics'de eşlenik ısı transferi ve AC/DC fizik ara yüzleri kullanılmıştır. Eşlenik ısı transferi, ısı transferi ve akışkan akışı modülünü içerir. Bu fizik ara yüzü, akışkan akışı modülüyle akışkanın hız, basınç gibi özellikleri, ısı transfer modülüyle de katı ve sıvıların ısı transfer davranışlarını oluşturmamızı sağlamıştır. Katı ve sıvı malzemelerin ısı transfer çözeltisi ısı transfer fizik ara yüzünde incelenmiş ve bu çalışmada konveksiyon ve iletim ısı transferi gerçekleşmiştir. Sıvıyı analiz etmek için akışkan akışı modülü kullanılmış ve sıvıların akış tipi olarak laminer akış ara yüzü seçilmiştir. Isı transferinin neden olduğu enerjinin elektriksel dönüşümü, AC/DC modülünde bulunan elektrik akımı fizik ara yüzü ile analiz edilmiştir. TE etkileri kapsayan bu ara yüzeyde akım, elektrik potansiyel dağılımı ve elektrik alanı analiz edilmiştir. Eşlenik ısı transferi ve elektrik akımı fizik ara yüzlerinde oluşturulan model özellikleri, çözüm için Multiphysics' de izotermal olmayan akış, TE etkiler, sıcaklık bağlantısı bölümlerine program tarafından otomatik olarak atanmıştır.

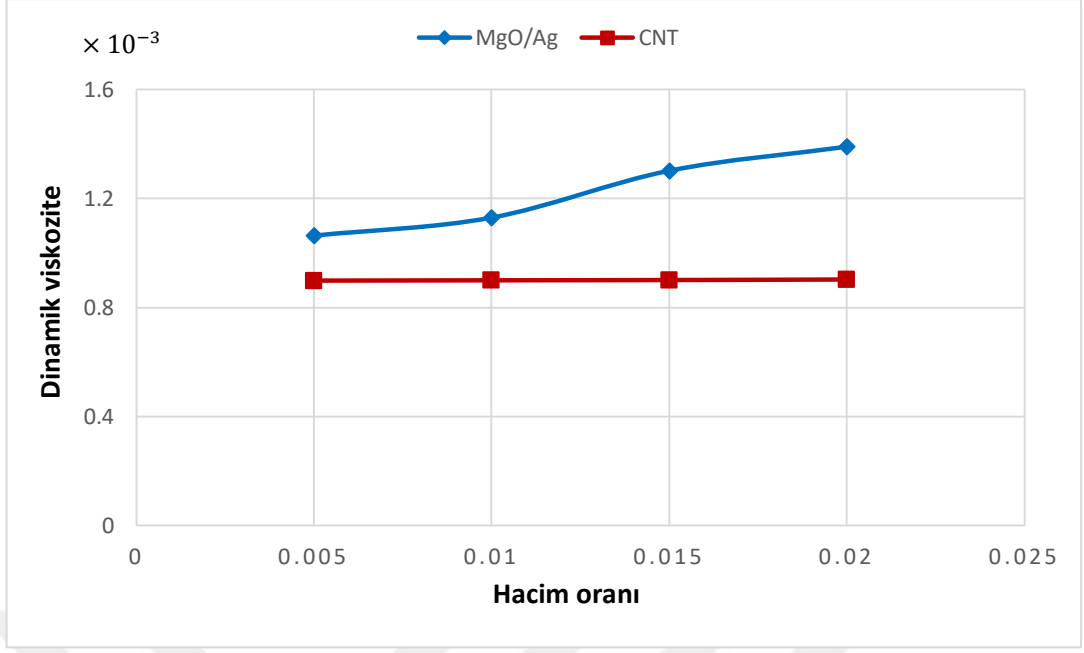
6.8.2. Analiz Sonuçları

Bu bölümde, sıcaklık gradyanını oluşturan kanal içindeki akışkanların farklı parametrelerde TEJ'in çıkış gücü ve verimliliği üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Isı değiştirici görevindeki akışkanlar kanallara, 323,15 K sıcak akışkan ve 293,15 K soğuk akışkan olmak üzere giriş yapar. Oluşturulan sıcaklık aralığında suyun ısı transferini belirleyen termofiziksel özellikleri Comsol Multiphysics'de materyal bölümden seçilir ve su bazlı MgO/Ag ve CNT nanoakışkanlarının termofiziksel özellikleri hesaplanır. TEJ verimi için akışkanın ısı transfer özellikleri büyük öneme sahiptir. Akışkan olarak seçilen su, su bazlı MgO/Ag ve CNT nanoakışkanlarının ısı iletkenlik ve dinamik viskozite gibi termofiziksel özellikler akışkanların ısı transfer performanslarını etkiler. Su için sıcaklığa bağlı olan bu parametreler nanoakışkanlarda sıcaklıkla birlikte hacim oranlarına da bağlıdır. Yapılan çalışmada nanoakışkanların hacim oranları 0,005, 0,01, 0,015 ve 0,02 değerlerinde incelenmiştir. Bu hacim oranlarına sahip nanoakışkanların ısı iletkenlik ve dinamik viskozite değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlarda nanoakışkanların bu termofiziksel özellikleri hacim oranına bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

Nanoakışkanların ısı iletkenliği hacim oranının artmasıyla artmıştır (şekil 6.6) ve dinamik viskozite değeri de MgO/Ag nanoakışkanda belirgin bir artış sergilerken, CNT nanoakışkanda daha kúçuk miktarlarda artış olmuştur (şekil 6.7). Su bazlı CNT nanoakışkanın 0,01 hacim oranındaki ısı iletkenlik değeri 0,05 hacim oranına góre %7 oranında MgO/Ag hibrit nanoakışkanın ısı iletkenliği ise nanoakışkanın 0,01 hacim oranında 0,005 hacim oranına góre %4'lúk artış göstermiştir. Ayrıca nanoakışkanların ózgúl ısı kapasitesi ve yoğunluk değerleri de hesaplanmıştır. Belirlenen akışkan ózellikleri materyal bólúmüne girildikten sonra programda eşlenik ısı trnsfer modúlüne otomatik olarak atanır.

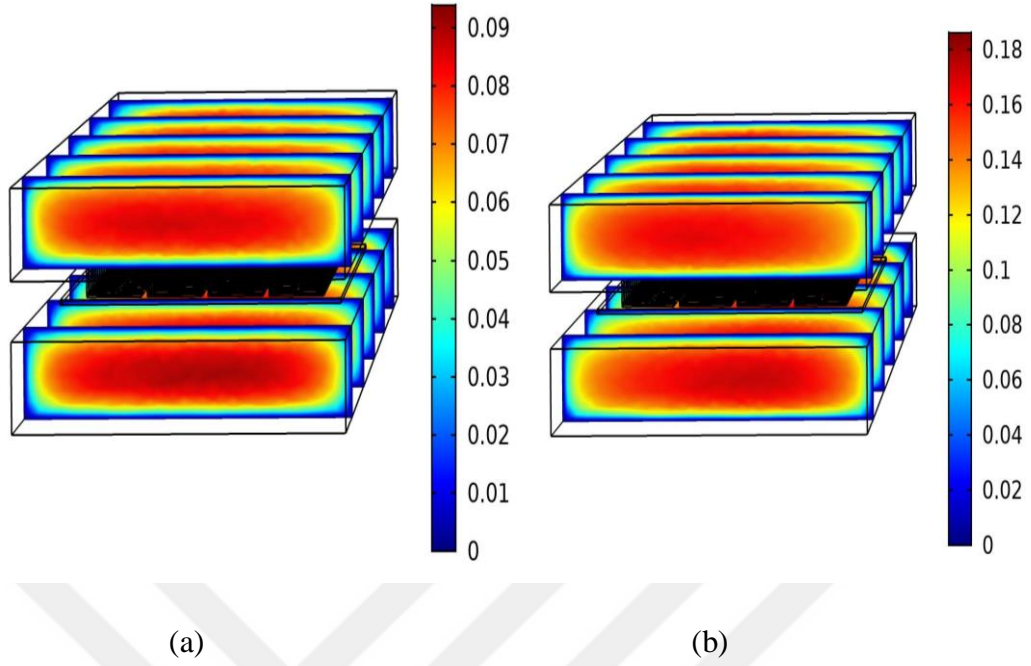


şekil 6.6. Nanoakışkanların farklı hacim oranlarındaki ısı iletkenlik değerleri



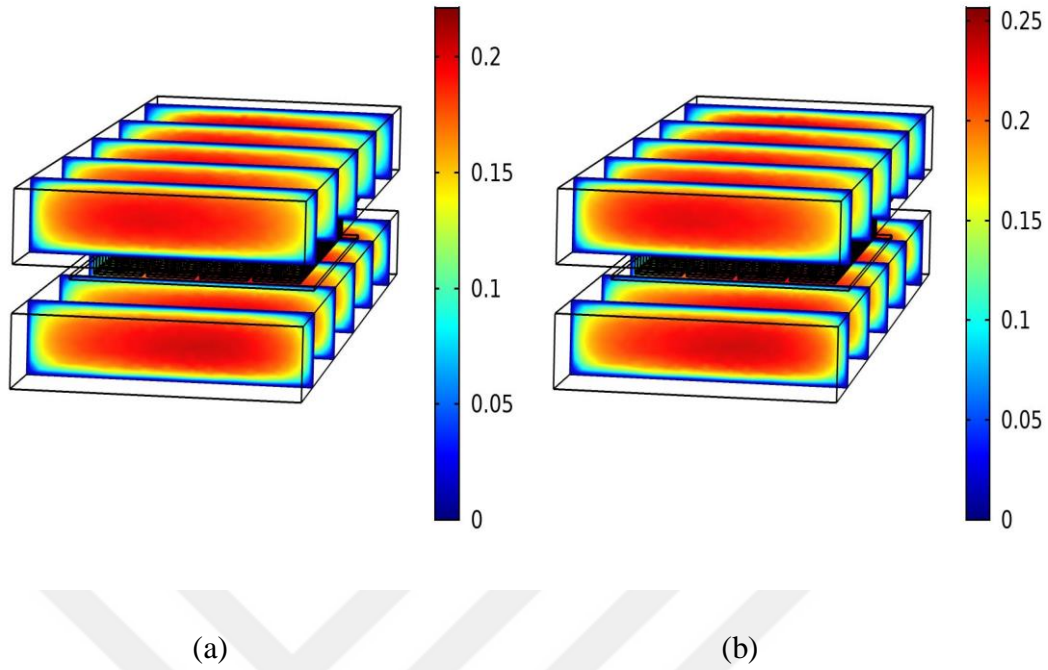
Şekil 6.7. Nanoakışkanların farklı hacim oranlarındaki dinamik viskozite değerleri

Akışkanlar laminar akış formundadır ve 100, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500 Reynolds sayılarında değerlendirilecektir. Akışkanın dinamik viskozitesi, yoğunluğu gibi özelliklerinin yanı sıra Reynolds sayısı da akışkan hızı hesaplamalarında kullanılan önemli parametreler arasındadır. Farklı Reynolds sayılarında, akışkanın termofiziksel özellikleri sabit kaldığında akışkan hızları farklılık gösterir. Örneğin Reynolds sayısı 750 ve 1500 alındığında Comsol Multiphysics’de elde edilen analizlerde suyun hızı bulunmuştur (Şekil 6.8). Reynolds sayısındaki artış ile orantılı olarak akışkan hızı da artmıştır.



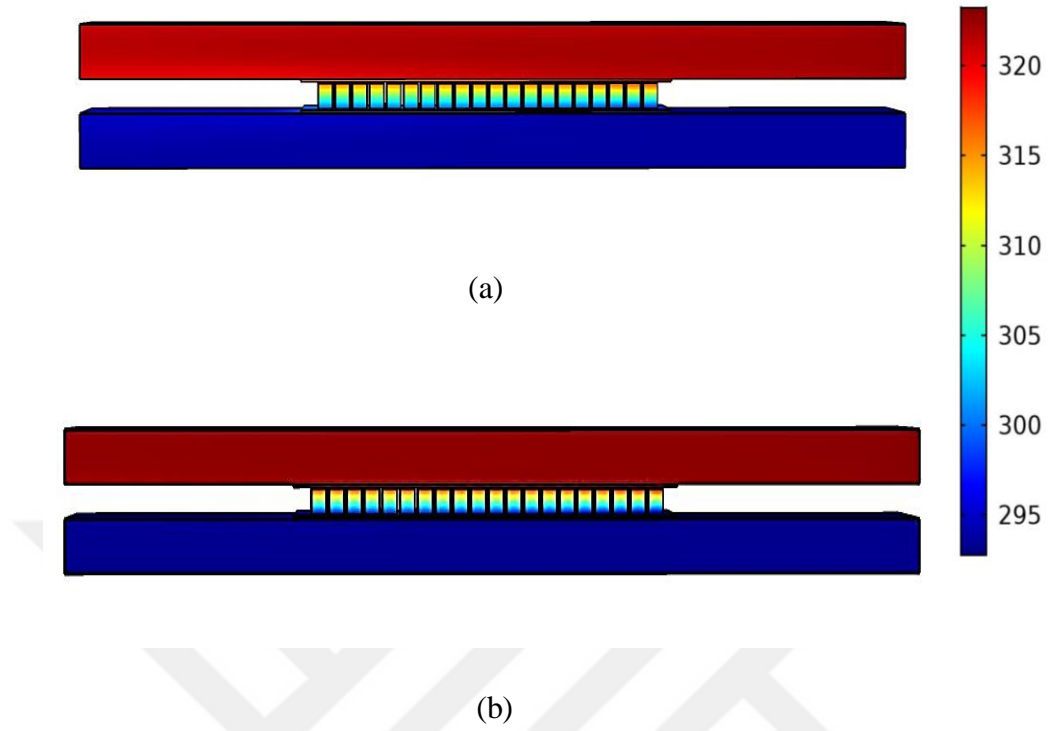
Şekil 6.8. Farklı Reynolds sayılarında suyun akış hızı (a) Reynolds sayısı 750 (b) Reynolds sayısı 1500

Aynı koşullarda bulunan akışkanın Reynolds sayısındaki değişiklik akışkan hızını etkilemiştir. Reynolds sayısındaki artışa paralel olarak akışkan hızı da artış göstermiştir. Su için incelenen bu durum nanoakışkanlar için de incelenmiş Reynolds sayısının akışkan hızını aynı şekilde etkilediği görülmüştür. Ayrıca nanoakışkanların hacim oranlarının hız üzerinde önemli bir parametre olduğu bilinmektedir. Hacim oranındaki değişiklik akışkan hızını etkileyen dinamik viskozite ve yoğunluk gibi termodinamik parametreleri değiştireceğinden hız değerinde de değişiklik olacaktır. Birbirini etkileyen bu parametreler dikkate alındığında, Reynolds sayısını 1500 sabit değerinde, 0,01 ve 0,02 hacim oranlarına sahip Ag/MgO hibrit nanoakışkanın hız değişimi incelenmiş ve Şekil 6.9 gibi bir sonuç elde edilmiştir. Nanoakışkanın hacim oranındaki artışın MgO/Ag nanoakışkan hız miktarına olumlu katkı sağladığı görülmüş ve benzer şekilde CNT nanoakışkan için de farklı hacim oranlarında akışkan hızında değişim olduğu gözlenmiştir.



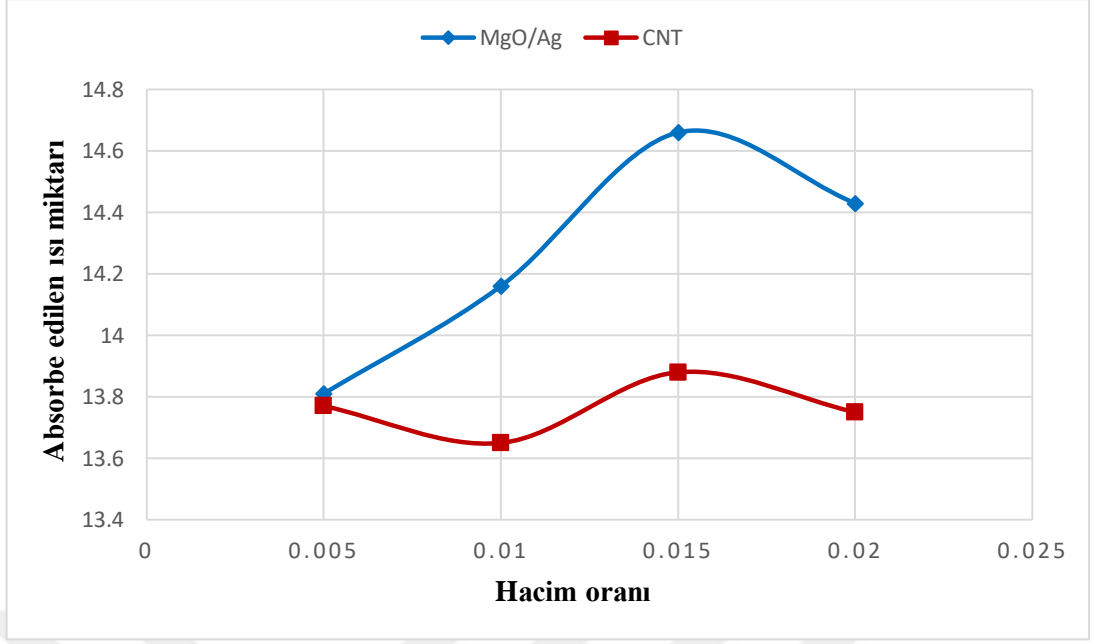
Şekil 6.9. Sabit bir Reynolds sayısında farklı hacim oranlarındaki su bazlı MgO/Ag hibrit nanoakışkanın akış hızı (a) 0,01 hacim oranı (b) 0,02 hacim oranı

Akışkanların taşınım ısı transferinde akışkan hızı önemli bir değerdir. Ayrıca akışkanların değişen termofiziksel özellikleri de ısı transferinin belirlenmesini sağlar. Farklı Reynolds sayıları akışkan hızını etkileyerek ve farklı hacim oranları nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini etkileyerek, akışkanların ısı transfer performanslarında değişiklik göstermesine neden olur. Farklı Reynolds sayılarında suyu, 313,15 K sıcak ve 293,15 K soğuk akışkan olarak değerlendirdiğimizde ısı özellikleri farklılık gösterecektir. Bu şartlarda Comsol Multiphysics’de suyu incelediğimizde Reynolds sayısındaki artışın kanal içindeki akışkanın sıcaklık dağılımının olumlu yönde değiştiği görülmüştür (Şekil 6.10). Ayrıca nanoakışkanların hacim oranlarının da ısı transferine etkisi incelenmiş farklı hacim oranlarında hem su bazlı MgO/Ag hem de CNT nanoakışkan için ısı transferi özellikleri değişmiştir. Reynolds sayısındaki artış ile artan ısı performans, hacim oranındaki artış ile yer yer değişiklik göstermiştir.



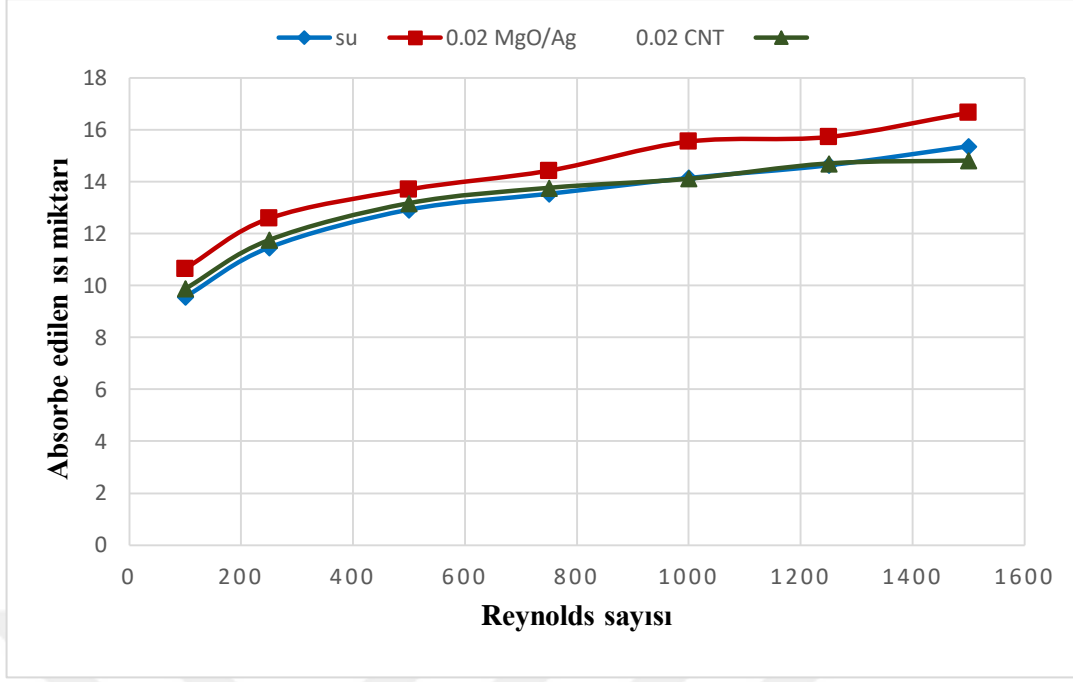
Şekil 6.10. Farklı Reynolds sayılarında suyun sıcaklık dağılımı (a) Reynolds sayısı 750 (b) Reynolds sayısı 1500

Isı değiştirici olarak kullanılan akışkanlardaki ısıl değişimler TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyelini ve çıkış gücünü dolayısıyla verim değerlerini etkilemektedir. Bunun nedeni hem akışkanların ısı transferlerinin sıcaklık gradyanını belirleyerek bu değerlere etki etmesi hem de TEJ performansının belirlenmesinde absorbe edilen ısı miktarının önemli bir faktör olmasıdır. Nanoakışkanları bu duruma bağlı olarak, sabit bir Reynolds sayısında (750), farklı hacim oranlarında ele aldığımızda absorbe edilen ısı miktarı farklılık göstermiştir (Şekil 6.11). Hacim oranındaki artış, ısı transferini etkileyen termofiziksel özellikler doğrultusunda bu değeri etkilemiştir. Su bazlı MgO/Ag nanoakışkanı baz alınan 750 Reynolds sayısı değerinde, su bazlı CNT nanoakışkanına göre daha yüksek ısı miktarına sahip olmuştur. Kullanılan akışkanlar ayrı ayrı incelendiğinde su, su bazlı 0,01 hacim oranına sahip MgO/Ag ve CNT nanoakışkan için bu miktar sırasıyla 13,53 W, 14,16 W ve 13,65 W bulunmuştur. Her iki nanoakışkan kullanımı da suya göre absorbe edilen ısı miktarını arttırmıştır.



Şekil 6.11. Nanoakışkanların farklı hacim oranlarına sahip olması durumunda sıcak tarafta absorbe edilen ısı miktarı

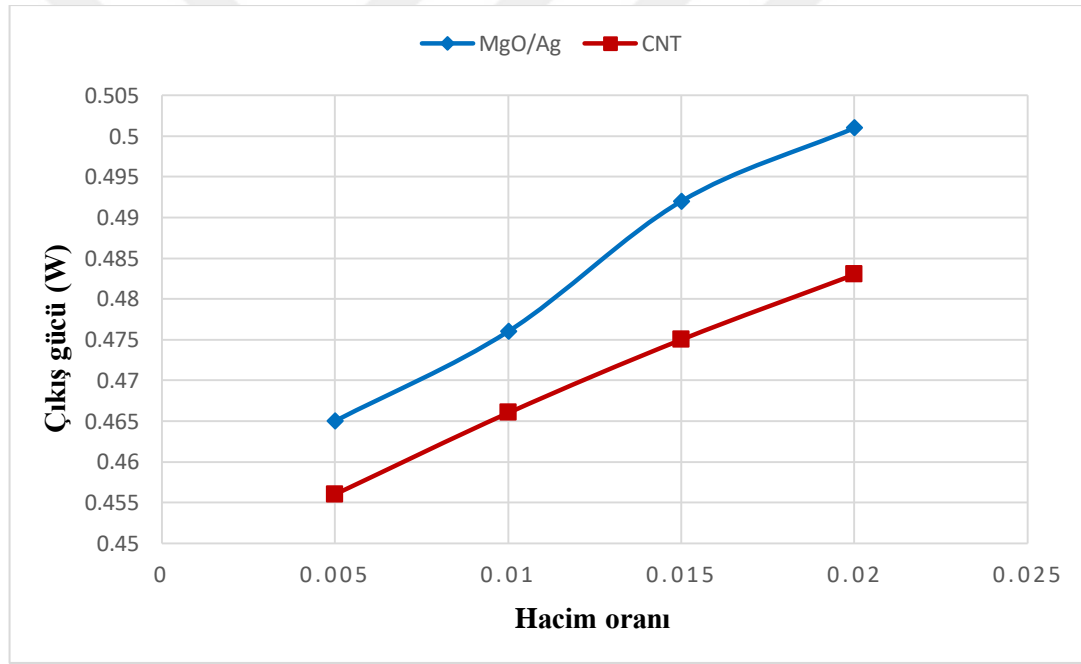
Sıcak tarafta absorbe edilen ısı miktarı farklı Reynolds sayılarında su, su bazlı MgO/Ag hibrit nanoakışkan ve CNT nanoakışkan için değerlendirilmiştir. Reynolds sayısındaki değişiklik absorbe edilen ısı miktarında değişikliğe sebep olmuştur. Akışkanların farklı Reynolds sayısındaki absorbe edilen ısı miktarı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her akışkan için farklı olan ısı miktarı hesaplanmıştır. Nanoakışkanların hacim oranları 0,02 sabit değerinde alındığında, akışkanların absorbe edilen ısı miktarı üzerindeki etkisi Şekil 6.12’de belirtilmiştir. Reynolds sayısındaki değişiklik akışkanların sıcak tarafa absorbe ettiği ısı miktarını değiştirmiş, dolayısıyla TEJ’de elde edilen verilerde değişikliklere yol açmıştır. Akışkanların farklı parametrelerdeki bu değişimlerinin TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyeli üzerinde oldukça önemli bir etkisi vardır. Akışkanların ısı transferindeki bu davranışlar, aynı zamanda TEJ için etken bir parametre olan sıcaklık gradyanını da etkileyerek, TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyelinde de değişikliğe sebep olur. Farklı sıcaklık aralıklarından etkilenen parametreler, TEJ veriminde farklılıklara sebep olacaktır.



Şekil 6.12. Farklı Reynolds sayılarında su ve nanoakışkan kullanımında sıcak tarafta absorbe edilen ısı miktarı

Nanoakışkan kullanımının, nanoakışkanların farklı hacim oranlarının ve akışkanların farklı Reynolds sayısı değerlerinin TEJ'in elektrik potansiyeli ve güç çıkışı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Referans olarak 750 ve 1500 Reynolds sayıları değerlendirilmiştir. Sıcak akışkan için 313,15 K ve soğuk akışkan için 293,15 K sıcaklıkta ve her akışkan laminar akış formundayken, Reynolds sayısı 750 alındığında su ve 0,01 hacim oranına sahip su bazlı Ag/MgO ve CNT nanoakışkan kullanımı için TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyeli incelenmiştir. Bu şartlar altında su, MgO/Ag ve CNT kullanımı için üretilen elektrik potansiyelleri sırasıyla 0,73 V, 0,756 V ve 0,748 V bulunmuştur. TEJ'i oluşturan yarıiletkenlerin malzeme özellikleri ve geometrik özellikleriyle hesaplanan iç direnç R_{int} , TEJ çıkış gücü üzerinde oldukça önemli bir parametredir. Ohm yasasına göre elde edilen TEJ çıkış gücü iç direnç yardımıyla elde edilir. Modelde kullanılan parametreler doğrultusunda iç direnç $R_{int}=1,2 \Omega$ olarak hesaplanmış üretilen elektrik potansiyeli göz önünde alındığında TEJ çıkış gücü su, su bazlı 0,01 hacim oranında MgO/Ag ve CNT nanoakışkan kullanımı için sırasıyla 0,445 W, 0,476 W ve 0,466 W bulunmuştur. Aynı sıcaklık gradyanı ve Reynolds sayısında nanoakışkanların farklı hacim oranlarında kullanımı TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyelini etkilemiştir. 0,02 hacim oranlarında MgO/Ag kullanımında elektrik potansiyeli 0,775 V ve CNT kullanımında 0,761 V üretilmiştir.

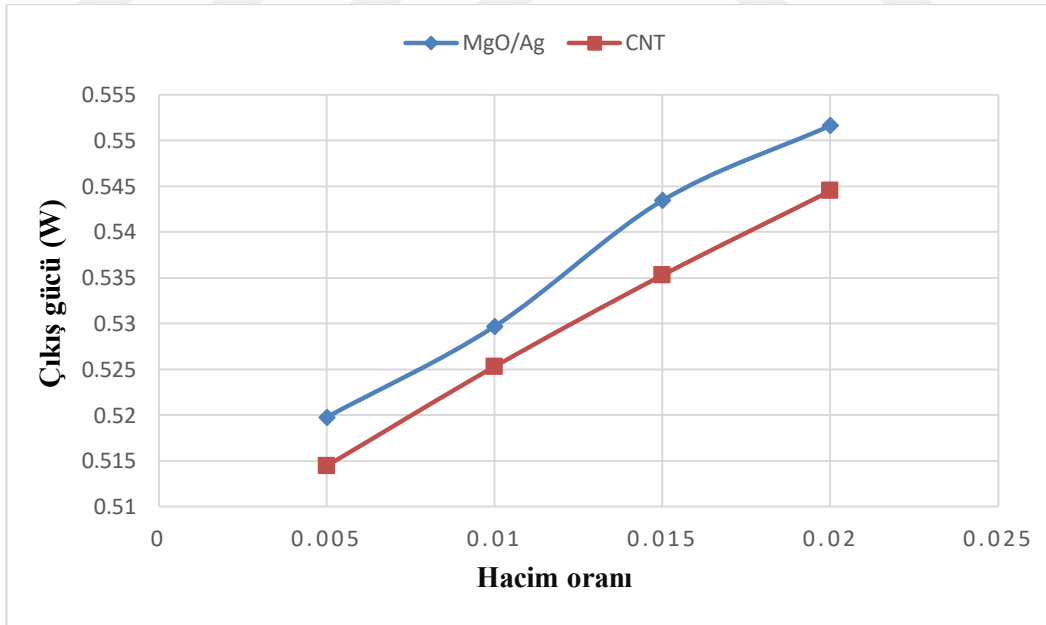
Hacim oranındaki artış elektrik potansiyelini etkilemiş dolayısıyla çıkış gücünü de etkilemiştir. Şekil 6.13 nanoakışkanların sabit Reynolds sayısı değerinde farklı hacim oranlarının TEJ çıkış gücü üzerindeki etkisini göstermektedir. TEJ çıkış gücü, nanoakışkanların hacim oranlarındaki artış ile birlikte artış göstermiştir. Nanoakışkanların ısı transfer özelliklerini etkileyen hacim oranı değerleri, TEJ sisteminde ısı değiştirici göreviyle de ısı transfer performansındaki değişiklik ile TEJ çıkış gücü üzererinde etkili olduğunu göstermiştir. TEJ’de önemli faktörlerden biri olan sıcaklık gradyanı değişen nanoakışkan özellikleriyle farklılık göstermiş ve üretilen elektrik potansiyelini etkileyerek çıkış gücün de bir değişikliğe sebep olmuştur. Hacim oranlarındaki artış TEJ çıkış gücünde de artışa sebep olmuştur. Su bazlı MgO/Ag nanoakışkan, CNT nanoakışkana göre TEJ gücünün daha yüksek değerlere ulaşmasını sağlamıştır.



Şekil 6.13. Sabit bir Reynolds sayısında (750) nanoakışkanların hacim oranlarının TEJ çıkış gücüne etkisi

Reynolds sayısındaki farklılığın akışkanlar üzerindeki etkisini incelemek için, akışkanların Reynolds sayısı daha yüksek bir değer olan 1500 alınmış, su ve 0,01 hacim oranlarında MgO/Ag ve CNT nanoakışkanın kullanılmasıyla TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyeli ve çıkış gücü tekrardan hesaplanmıştır. TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyeli su, su bazlı MgO/Ag hibrid nanoakışkan ve su bazlı CNT nanoakışkan için sırasıyla 0,776 V, 0,797 V, 0,794 V bulunmuştur. Elektrik

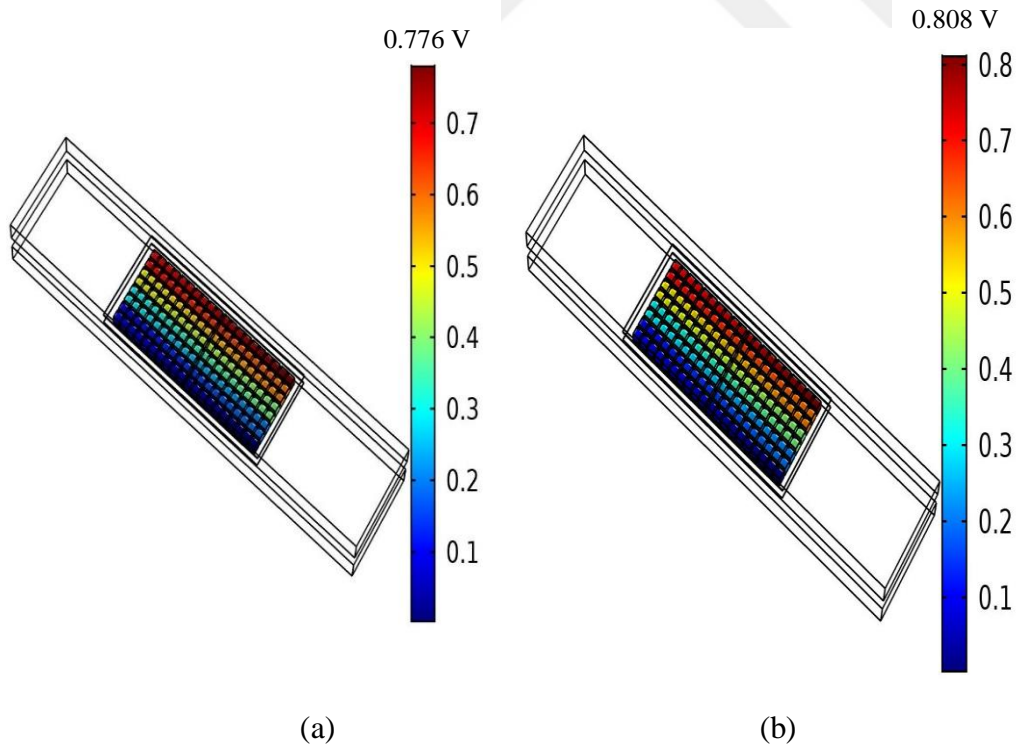
potansiyelinde elde edilen bu değerler doğrultusunda TEJ çıkış gücü su, MgO/Ag ve CNT nanoakışkanı için sırasıyla 0,503 W, 0,529 W, 0,525 W olarak hesaplanmıştır. Nanoakışkanların hacim oranları 0,02 alındığında üretilen elektrik potansiyeli MgO/Ag ve CNT için sırasıyla 0,813 V ve 0,808 V bulunmuş, TEJ çıkış gücü ise 0,552 W ve 0,544 W hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyeli ve çıkış gücü gibi değerlerin, Reynolds sayısındaki artışla artış gösterdiği yönündedir. Bu durum su, su bazlı MgO/Ag ve CNT nanoakışkanında da geçerli olmuştur. Akışkanın ısı transferinde etkili olan Reynolds sayısındaki artış, ısı değiştrici görevindeki akışkanların ısı transfer performanslarına olumlu yansımıştır dolayısıyla sistemin belirlenen özelliklerinde artışa sebep olmuştur. Nanoakışkanların hacim oranındaki değişikliğin TEJ çıkış gücü etkilediği bilinmektedir. Bu doğrultuda Reynolds sayısı 1500 iken farklı hacim oranlarına sahip nanoakışkanlar değerlendirilmiştir (Şekil 6.14). Nanoakışkan hacim oranındaki artış benzer şekilde Reynolds sayısı 750 alındığında olduğu gibi artış göstermiştir ve MgO/Ag nanoakışkan kullanımı CNT nanoakışkan kullanımına göre daha yüksek çıkış gücü elde etmemizi sağlamıştır. Artan Reynolds sayısı ve hacim oranıyla artış gösteren TEJ çıkış gücü, daha düşük Reynolds sayısına göre daha yüksek bir değere ulaşmıştır.

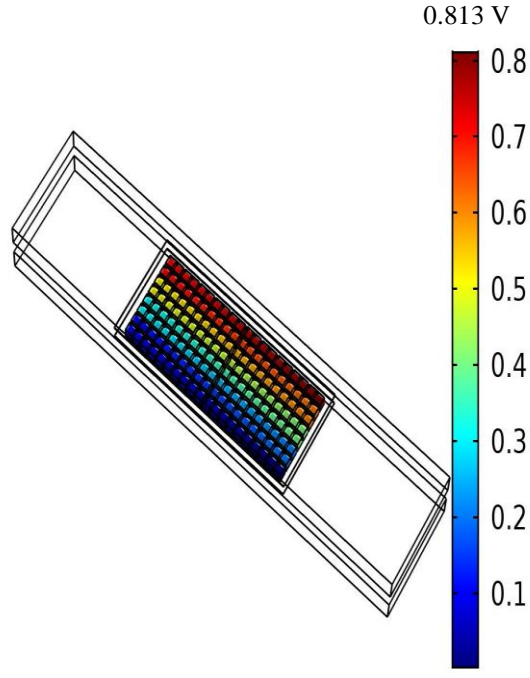


Şekil 6.14. Sabit bir Reynolds sayısında (750) nanoakışkanların hacim oranlarının TEJ çıkış gücüne etkisi

Karşılaştırılan 750 ve 1500 Reynolds sayılarında akışkanların TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyeli ve çıkış gücü üzerindeki etkileri farklılık göstermiştir. Buna ek

olarak, TEJ tarafından üretilen elektriksel potansiyeli, nanoakışkan kullanımında, su kullanımından daha yüksek bir değere ulaşmıştır. Comsol Multiphysics’de analiz edilen elektrik potansiyelleri Şekil 6.15 su ve su bazlı 0,02 hacim oranına sahip MgO/Ag ve CNT nanoakışkanlar için gösterilmiştir. Akışkanlar 1500 sabit Reynolds sayısına sahiptir. Nanoakışkanlar 0,005 düşük hacim oranına sahip olduğunda bile MgO/Ag kullanımında 0,79 V ve CNT kullanımında 0,786 V elektrik potansiyeli değeriyle suya göre daha yüksek elektrik potansiyeli üretimi sağlamıştır. Nanoakışkanlar Reynolds sayısı 1500 alındığında 0,02 hacim oranına sahip olduğunda en yüksek elektrik potansiyel üretimi ve çıkış gücü değerleri elde edilmiştir. Bu durum farklı Reynolds sayıları ele alındığında da geçerli olmuştur. TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyeli en düşük değere su kullanımında, en yüksek değere su bazlı MgO/Ag hibrit nanoakışkan kullanımında ulaşmıştır. Su bazlı MgO/Ag hibrit nanoakışkan kullanımı, CNT nanoakışkan kullanımına göre daha yüksek elektrik potansiyel üretimini sağlamıştır. Mg/Ag nanoakışkan kullanımında ele alınan tüm parametrelerde (farklı Reynolds sayıları ve hacim oranları) diğer akışkanlara göre TEJ elektrik potansiyeli ve çıkış gücü daha yüksek değerlerde olmuştur.



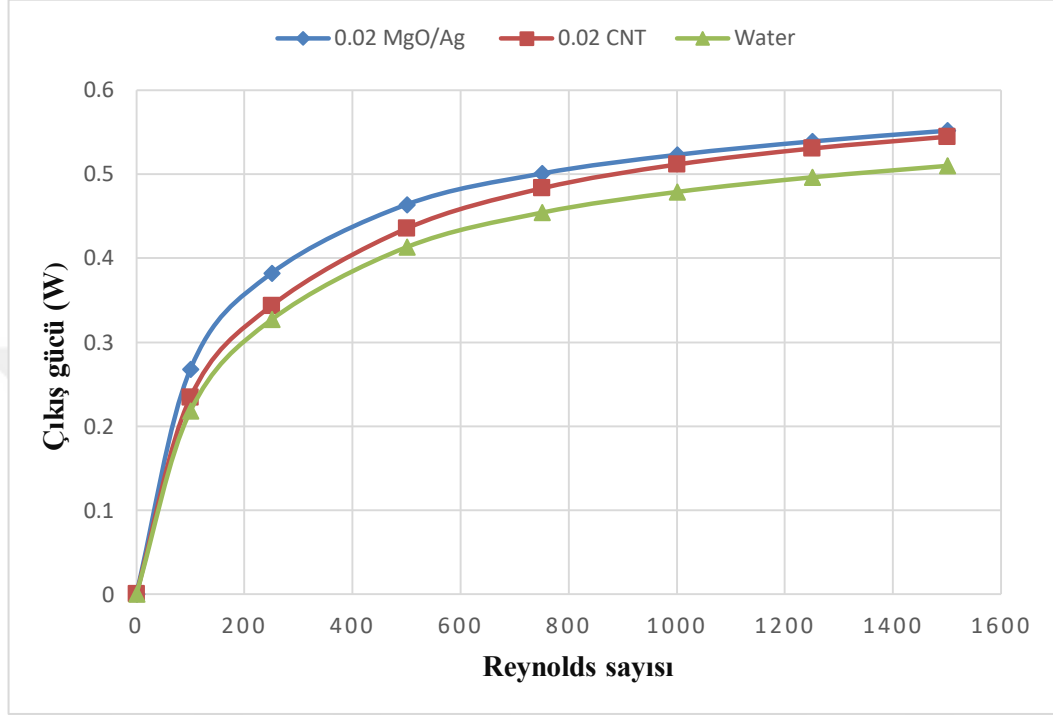


(c)

Şekil 6.15. Kullanılan akışkanların 1500 Reynolds sayısında TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyeline etkisi (a) su (b) 0,02 hacim oranlı CNT nanoakışkan (c) 0,02 hacim oranlı MgO/Ag hibrit nanoakışkan

Kullanılan tüm akışkanları farklı Reynolds sayılarında değerlendirdiğimizde TEJ çıkış gücünde Şekil 6.16'daki sonuçlar elde edilmiştir. Değerlendirmemiz her ne kadar 0,02 hacim oranlı nanoakışkanlar için olsa da TEJ çıkış gücü, kullanılan her Reynolds sayısında ve nanoakışkan hacim oranında, nanoakışkan kullanımında su kullanımına göre daha yüksek bir değere ulaşmıştır. Bu hacim oranında en yüksek TEJ elektrik potansiyeli değeri ve çıkış gücü MgO/Ag nanoakışkan kullanımı ile gerçekleşmiştir. Bu durumu CNT nanoakışkan kullanımı ve su kullanımı takip etmiştir. Reynolds sayısındaki artış kullanılan tüm akışkanlarda TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyelini ve çıkış gücünü arttırmıştır. Örneğin, Reynolds sayısını 100 aldığımızda su, 0,015 hacim oranında su bazlı CNT ve MgO/Ag nanoakışkan kullanımında TEJ elektrik potansiyel değerleri sırasıyla 0,5 V, 0,523 V ve 0,556 V bulunmuştur. Su ve aynı hacim oranlarındaki CNT ve MgO/Ag nanoakışkanları 1250 Reynolds sayısında sırasıyla %53,2, %51,2 ve %43,5'lik bir artış ile 0,766 V, 0,791 V ve 0,798 V değerinde TEJ elektrik potansiyel üretimi sağlamıştır. Aynı şartlarda elektrik potansiyeline bağlı güç üretimini değerlendirdiğimizde Reynolds sayısı 100 iken TEJ çıkış gücü su, CNT, MgO/Ag nanoakışkan için sırasıyla 0,21 W, 0,23 W ve 0,26 W

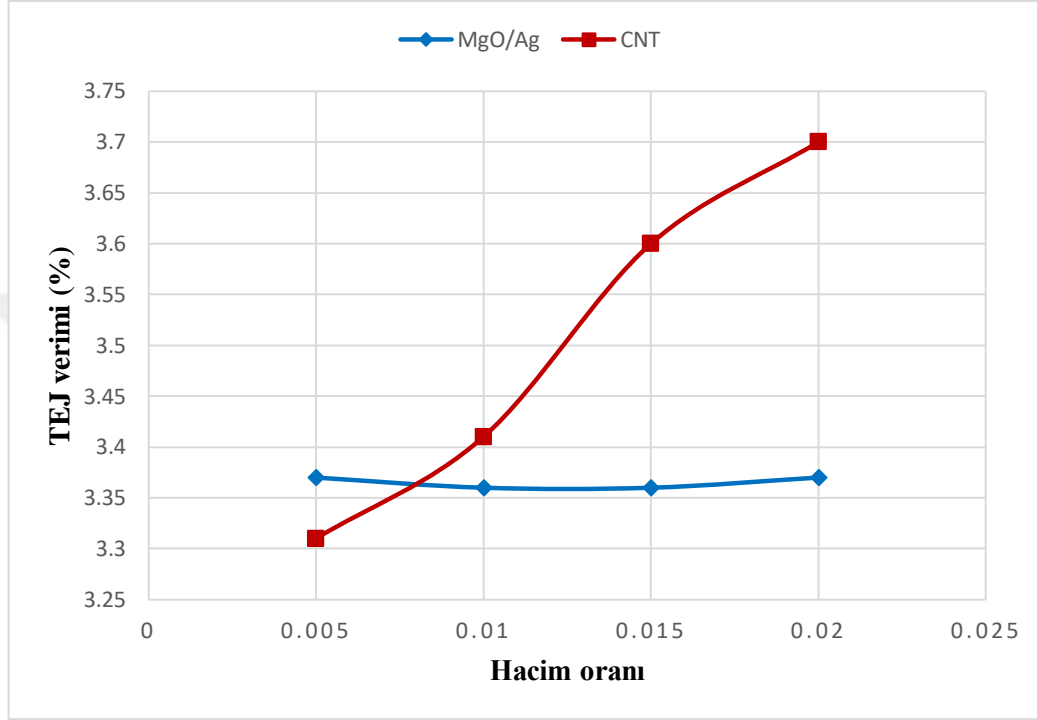
gibi çok düşük değerlerde bulunmuştur. Reynolds sayısının 1250 değerine yükselmesiyle su, CNT ve MgO/Ag nanoakışkan için 0,5 W, 0,521 W ve 0,53 W değerine yükselmiştir.



Şekil 6.16. Farklı Reynolds sayılarında kullanılan akışkanların TEJ çıkış gücüne etkisi

TEJ verimini belirlemek için, absorbe edilen ısı miktarı ve güç çıkışı ile elde edilir. Değişen parametreler doğrultusunda elde edilen bu sonuçlar ile TEJ verimi incelenmiştir. Ayrıca nanoakışkanlar farklı hacim oranlarında da değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarla TEJ verimliliği hesaplanmıştır. Güç çıkışına ve sıcak tarafta absorbe edilen ısı miktarına dayanarak Reynolds sayısı 750 alındığında, su, 0,01 hacim oranına sahip su bazlı MgO/Ag hibrit nanoakışkan ve CNT nanoakışkan kullanıldığında TEJ verimi sırasıyla %3,28, %3,36, %3,41 olarak hesaplanmıştır. Aynı şartlarda, farklı hacim oranlarına sahip nanoakışkanların TEJ verimliliği üzerindeki etkisi Şekil 6.17’de gösterilmiştir. Nanoakışkanların hacim oranındaki değişiklik TEJ veriminde değişikliğe yol açmıştır. Bu akışkanların farklı hacim oranlarında sergilediği ısı transfer davranışına paralel olarak değişiklik gösteren TEJ elektrik potansiyeli verim değerlerini etkilemiştir. Bu parametrelerde değerlendirildiğinde CNT nanoakışkan kullanımı, MgO/Ag nanoakışkan kullanımına kıyasla daha belirgin değişikliklere yol açmıştır. CNT, MgO/Ag nanoakışkana göre daha yüksek verim

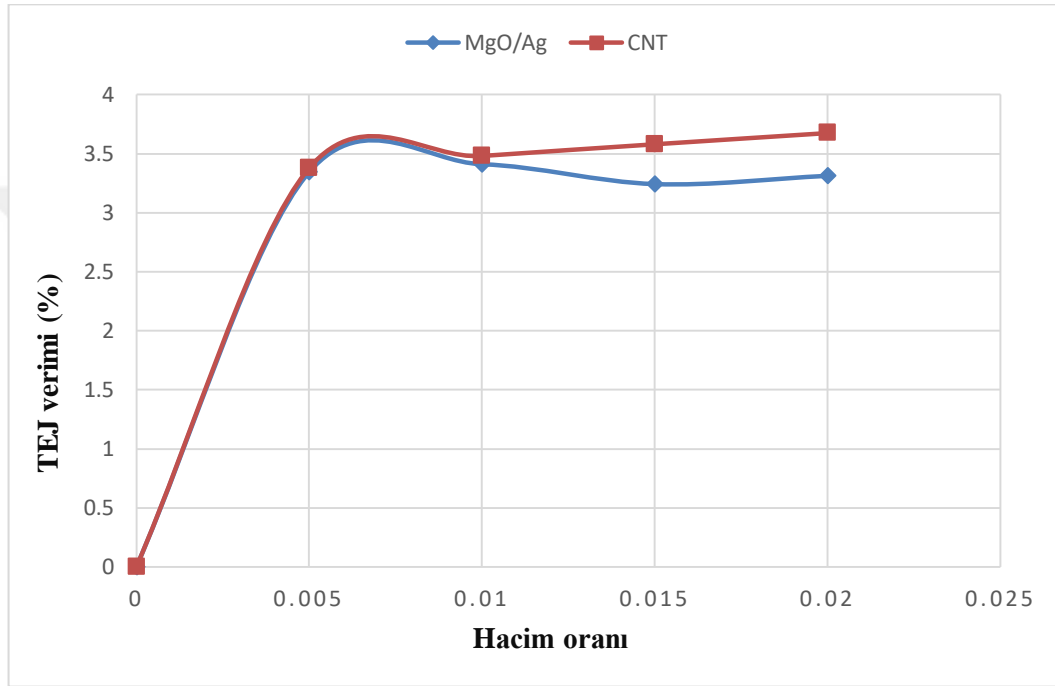
değeri elde etmemizi sağlamış, ayrıca bu nanoakışkanlar, suya göre elde ettiğimiz verimi daha yüksek değerlere çıkarmıştır. Tüm bunlar göz önüne alındığında nanoakışkan kullanımı TEJ verimi üzerinde olumlu sonuçlar elde etmemizi sağlamıştır.



Şekil 6.17. Farklı hacim oranlarına sahip nanoakışkanların TEJ çıkış gücüne etkisi

Reynolds sayısındaki değişikliğin TEJ verimine etkisini incelemek için farklı bir Reynolds sayısında akışkanlar değerlendirilmiştir. Su, su bazlı 0,01 hacim oranına sahip MgO/Ag ve CNT nanoakışkan kullanımı için 1500 Reynolds sayısında TEJ verimi değerlendirilmiştir. Su, MgO/Ag hibrit nanoakışkan ve CNT nanoakışkanları kullanıldığında TEJ verimliliği sırasıyla %3,27, %3,42 ve %3,438 olarak hesaplanmıştır. Aynı koşullarda farklı hacim oranlarına sahip nanoakışkan kullanıldığında TEJ verimliliği hesaplanmış ve Şekil 6.18 gibi bir sonuç elde edilmiştir. Hacim oranlarındaki artış Reynolds sayısındaki değişiklik ile birlikte TEJ verimini etkilemiştir. Bu parametreler değerlendirildiğinde Reynolds sayısının artışı durumunda da nanoakışkan kullanımı, su kullanımına göre verim değeri üzerinde artış sağlamıştır. Nanoakışkanlar, 0,01 hacim oranlarına sahip iken su bazlı CNT, MgO/Ag hibrit nanoakışkana göre daha iyi TEJ verimi elde etmemizi sağlamıştır. Her ne kadar su bazlı MgO/Ag kullandığımızda TEJ üzerinde elde ettiğimiz elektrik potansiyeli ve

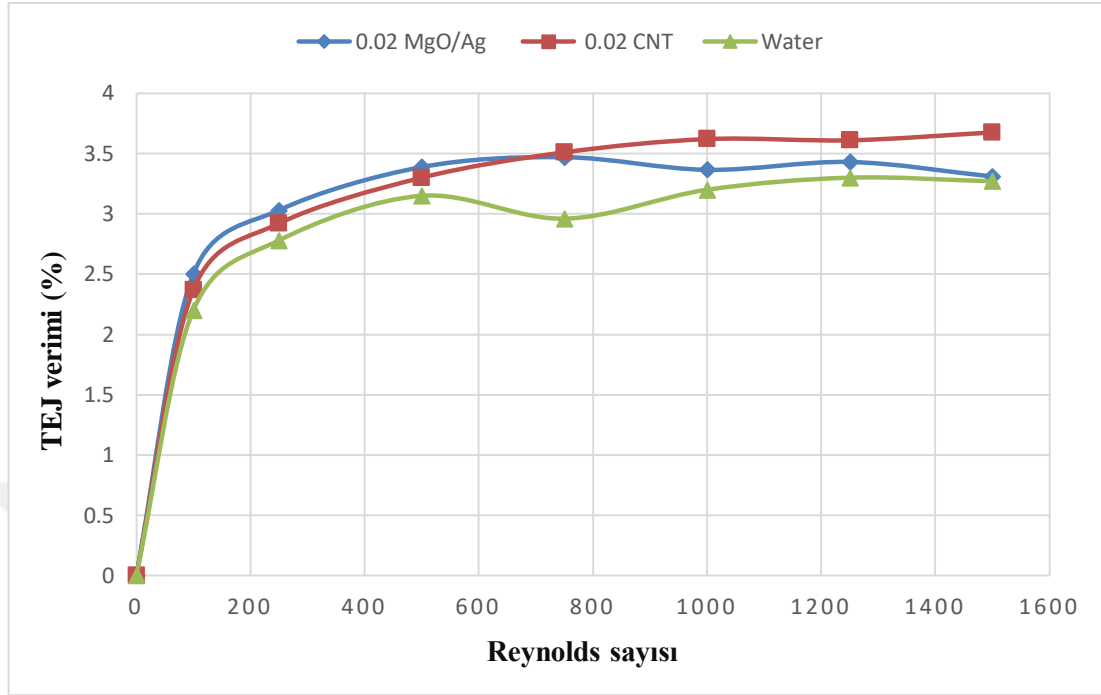
çıkış gücünde daha yüksek değerler etsek de absorbe edilen ısı miktarı su bazlı CNT kullanımında daha iyi verim değerlerine ulaşmamızı sağlamıştır. Reynolds sayısındaki artış, su kullanımında TEJ veriminde belirgin bir değişikliğe yol açmamıştır. Reynolds sayısındaki artışla verimlilik üzerindeki en belirgin değişiklik 750 Reynolds sayısına göre %1,7 oranında artış sağlayan su bazlı MgO/Ag nanoakışkan ile gözlemlenmiştir. Bu durumu %1,12'lik artış ile CNT nanoakışkan kullanımı takip etmiştir.



Şekil 6.18. Nanoakışkanların hacim oranlarındaki değişikliğin TEJ verimine etkisi

TEJ veriminin Reynolds sayısına ve nanoakışkanların hacim oranlarına göre değişiklikleri hesaplanmış ve farklı Reynolds sayılarında su, 0,02 hacim oranına sahip su bazlı MgO/Ag hibrit nanoakışkan ve CNT nanoakışkanı için TEJ verimi Şekil 6.19'daki gibi değişiklik göstermiştir. Kullanılan tüm farklı Reynolds sayısında ve nanoakışkan hacim oranlarında TEJ verimi nanoakışkan kullanımında, su kullanımına göre daha yüksek değerlere sahip olmuştur. Daha düşük Reynolds sayılarında MgO/Ag nanoakışkan, CNT nanoakışkana göre daha yüksek TEJ verimi elde etmemizi sağlasa da Reynolds sayısındaki artış ile birlikte MgO/Ag nanoakışkan kullanımı TEJ veriminde düşüşe neden olmuş, CNT nanoakışkan kullanımında daha yüksek verim değerleri elde edilmiştir. Benzer şekilde su kullanımında ilk etapta

Reynolds sayısındaki artış ile birlikte TEJ verimi artmış ancak belli bir değerden sonra değişiklik göstermiştir.



Şekil 6.19. Farklı Reynolds sayısındaki akışkanların TEJ verimine etkisi

6.8.3. Analiz Sonuçlarının Değerlendirmesi

İki kanal arasına yerleştirerek oluşturduğumuz TEJ sisteminde ısı değiştirici olarak kullandığımız kanal içindeki farklı akışkanlar (su, su bazlı MgO/Ag ve CNT nanoakışkan), Reynolds sayısı (100, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500) ve nanoakışkan hacim oranı (0,005, 0,01, 0,015, 0,02) gibi farklı parametrelerde incelenmiştir. Soğuk ve sıcak olarak kullandığımız bu akışkanlar, değişen parametrelerle birlikte ısı transfer performanslarında değişiklik göstermişlerdir. TEJ performansı, akışkanların ısı transferindeki değişiklikten etkilenmiştir. Akışkanların, TEJ elektrik potansiyeli, çıkış gücü ve verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre her iki nanoakışkanın kullanımı, su kullanımına göre TEJ sisteminin elektrik potansiyeli, çıkış gücü ve verimliliğinde daha yüksek değerlere ulaşmamızı sağlamıştır. Su bazlı MgO/Ag nanoakışkanı sahip olduğu tüm hacim oranlarında diğer akışkanlara göre daha yüksek elektrik potansiyeli ve çıkış gücü elde edilmesini sağlamıştır. En yüksek elektrik potansiyeli ve çıkış gücü, su bazlı 0,02 hacim oranına sahip MgO/Ag hibrit nanoakışkanın 1500 Reynolds sayısında elde edilmiş, bu sırayı aynı hacim oranında ve Reynolds sayısında CNT nanoakışkan ve aynı Reynolds sayısında su takip etmiştir.

TEJ dönüşüm verimliliği, Reynolds sayısı 1500 iken ve 0,02 hacim oranlı CNT nanoakışkan kullanımında elde edilmiştir. CNT kullanımında genellikle Reynolds sayısındaki artış TEJ dönüşüm verimliliğinin de artışını sağlamıştır. Kullanılan diğer akışkanlarda bu durum farklılık gösterse de MgO/Ag kullanımı, suya göre daha iyi verim sonuçları elde etmemizi sağlamıştır.

Referans alınan 750 Reynolds sayısında, 0,01 hacim oranında su bazlı CNT ve MgO/Ag nanoakışkan kullanımı sadece su kullanımına göre TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyelinde sırasıyla %2,46 ve %3,56 oranında bir artışa ve TEJ çıkış gücünde sırasıyla %4,72 ve %7 artışa neden olmuştur. Hacim oranı 0,02 alındığında, su bazlı CNT ve MgO/Ag kullanımı TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyelini, 0,01 hacim oranlı CNT ve MgO/Ag kullanımına göre sırasıyla %1,74 ve %2,5 oranında arttırmış ve TEJ çıkış gücü sırasıyla %3,65 ve %5 oranında artış göstermiştir. Bu değerleri su kullanımına kıyasla değerlendirdiğimizde 0,02 hacim oranında CNT ve MgO/Ag kullanımı, üretilen elektrik potansiyelini sırasıyla %4,25 ve %6,16 ve çıkış gücünü %8,54 ve %12,4 oranında arttırmıştır. Reynolds sayısı 1500 değerine yükseldiğinde, TEJ tarafından üretilen elektrik potansiyeli, su bazlı 0,01 hacim oranında CNT ve MgO/Ag kullanımı sadece su kullanımına kıyasla sırasıyla %2,32 ve %2,71 oranında arttırmış ve çıkış gücü sırasıyla %4,4 ve %5,2'lik artış göstermiştir. Ayrıca 0,02 hacim oranına sahip nanoakışkanlar, 0,01 hacim oranına sahip su bazlı CNT ve MgO/Ag nanoakışkana göre elektrik potansiyelinde sırasıyla %1,76 ve %2 ve çıkış gücünde sırasıyla %3,62 ve %4,35 oranında artış sağlamıştır. TEJ verimi, Reynolds sayısı 750 alındığında 0,01 hacim oranındaki su bazlı CNT ve MgO/Ag nanoakışkan kullanımı, su kullanımına göre %3,97 ve %2,44 oranında artmıştır. Aynı Reynolds sayısında hacim oranı 0,02 alındığında CNT ve MgO/Ag kullanımı, su kullanımına göre TEJ verimini sırasıyla %6,7 ve %5,8 oranında arttırmıştır. Akışkanların Reynolds sayısı 1500'e yükseldiğinde 0,01 hacim oranına sahip CNT ve MgO/Ag kullanımı su kullanımına göre TEJ verimini sırasıyla %5,14 ve %4,6 oranında arttırmıştır. Ayrıca nanoakışkanlar 0,02 hacim oranında alındığında CNT nanoakışkan suya göre TEJ veriminde %13,15'lik artış sağlatmış, MgO/Ag kullanımında ise su kullanımına göre %1,53 oranında artış sağlamıştır. Sonuçlar, TEJ sisteminde nanoakışkan kullanımının TEJ verimini arttırdığını ve farklı hacim oranlarındaki nanoakışkanların TEJ veriminde farklı değerler elde ettiğimizi göstermiştir. Ayrıca su bazlı CNT nanoakışkan kullanımı, su bazlı MgO/Ag hibrit

nanoakışkan kullanımına göre TEJ’de daha yüksek verim değerlerine ulaşmamızı sağlamıştır. Reynolds sayısındaki farklı değerler, kullanılan tüm akışkanlar için TEJ veriminde değişikliğe yol açmıştır. CNT nanoakışkan, artan hacim oranı ve Reynolds sayısı ile birlikte genelde verimde artışa sebep olmuştur. Ancak MgO/Ag kullanımını hacim oranlarındaki artışla yer yer TEJ veriminde düşme eğilimi göstermiştir. Ek olarak her iki nanoakışkan kullanımında TEJ sisteminden daha yüksek verim değerleri elde edilmiştir.

6.8.4. Elde Edilen Veriler ile Literatürdeki Benzer Çalışmaların Karşılaştırması

Nanoakışkan kullanımının TEJ verimine etkisiyle ilgili literatürde yer alan çalışmalar bulunmaktadır. Farklı nanoakışkan ve parametrelerle yapılan bu çalışmalardan elde edilen sonuçlarla yaptığımız bu çalışma ile elde ettiğimiz veriler karşılaştırılmıştır. Li ve ark. [57], 0,01 hacim oranına sahip grafen-su kullandıklarında sadece su kullanımına göre %3,5 oranında artış elde etmişlerdir. Zhao ve ark. [58], 363,15 K sıcak ve 293,15 K soğuk akışkan olarak su, su bazlı CuO nanoakışkanını makro ve mikro boyutlardaki TEJ sisteminde değerlendirmişlerdir. Makro boyutlardaki TEJ’de kullanılan su ve su bazlı CuO nanoakışkan kullanımıyla sırasıyla 0,65 W ve 0,43 W çıkış gücü elde etmişlerdir ve nanoakışkan dönüşüm verimliliğinde gelişme göstermemiştir. Ancak mikro boyutlardaki TEJ sisteminde su ve su bazlı CuO nanoakışkanını kullandıklarında çıkış gücü sırasıyla 2,5 W ve 3,45 W bulunmuş ve nanoakışkan kullanımı, su kullanımına göre TEJ dönüşüm verimliliğini %14 oranında arttırmıştır. Karana ve Sahoo [59], EG/W, ZnO ve MgO nanoakışkanlarını, otomotiv geri kazanım TEG sistemi için karşılaştırmışlardır. 500 K giriş egzoz sıcaklığı ve 298 K soğuk akışkan sıcaklığı kullanmışlardır. Sistemde MgO nanoakışkan kullanımı daha yüksek sıcaklık gradyanı oluşturmuş ve ZnO ve EG/W bu sırayı takip etmiştir. Buna bağlı olarak, MgO akışkan kullanımı TEJ sisteminin elektrik potansiyelinde, çıkış gücünde, dönüşüm verimliliğinde artış sağlamış ve bu durumu ZnO nanoakışkan ve EG/W kullanımı takip etmiştir. 500 K giriş egzoz sıcaklığında 0,01 hacim oranında MgO nanoakışkan TEJ çıkış gücü ve dönüşüm verimliliğini, EG/W soğutucusuna kıyasla %11,38 ve %10,95 oranında arttırmıştır. Li ve ark. [60], TEG sistemi için soğutucu akışkan olarak kullanılan etilen glikol (EG) bazlı Cu nanoakışkan ile etilen glikol/suyun (EG/W) karşılaştırmalı analizini yapmışlar ve Cu-EG nanoakışkanın sistem için güç çıkışını ve TE dönüşüm verimliliğini etkili bir şekilde artırabildiğini

gözlemlenmişlerdir. Egzoz giriş sıcaklığı 500-710 K aralığında değiştiğinde 0,03 hacim oranına sahip Cu-EG kullanımı 2,5-8 W aralığında TEG çıkış gücü sağlamıştır ve elde edilen bu oran EG/W kullanımına göre %12,65-%13,95 artış göstermiştir. Ayrıca, Cu-EG nanoakışkan soğutma sıvısı altında güç çıkışı artışı, TEM'lerin sıcak yan ısı transfer katsayısının artması nedeniyle EG/W soğutma sıvısından daha büyük bir değere sahip olmuştur. Abd El-Samie ve ark. [62], zikzak mikro kanal ısı alıcılarına (ZMCHS) sahip STEG (solar termoelektrik jeneratör) sisteminde soğutucu akışkan olarak Al_2O_3 /su nanoakışkan kullanmışlardır. Çalışma, ısı akışı (2-50 kW/m²), laminer akışta Reynolds sayısı (5-1500), giriş akış sıcaklığı (293-303 K) ve nanoparçacık konsantrasyonunun (%6), TEJ modülünün elektrik potansiyeline, çıkış gücüne ve verimliliğe etkileri üzerine odaklanmıştır. Isı akışındaki artış, çıkış gücünü ve TEJ verimini arttırmıştır ve daha yüksek Reynolds sayıları ($Re > 400$), giriş sıcaklığı ve nanoakışkan hacim oranı TEJ performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmamıştır. Isı akışını arttırmak hem çıkış gücünü hem de TEJ verimliliğini arttırmıştır. TEG çıkış gücü ve verimlilik sırasıyla 3,87 W ve %8,6'ya yükselmiştir. Suyun, su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanla değiştirilmesine gerek kalmadan STEG sisteminin çalışması için Reynold sayısı 30'dan düşük bir değerde alınmasını önermişlerdir. Xing ve ark. [61], soğutucu akışkan olarak su bazlı grafen nanoakışkan kullanmışlar ve bu nanoakışkanın farklı ağırlık oranlarında (%0,025, %0,05, %0,075 ve %0,01) TEJ üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Reynolds sayısı 15'e yakın bir değerde %0,025, %0,05, %0,075 ve %0,01 oranlardaki grafen nanoakışkan kullanımında TEJ dönüşüm verimliliği, %5,25, %7,14, %8,55 ve %10,23 oranında artmıştır. Ayrıca aynı Reynolds sayısında, ağırlıkça %0,025, %0,05, %0,075 ve %0,1 grafen dağıtılmış nanoakışkan kullanımı, elektrik potansiyelini sırasıyla %4,30, %5,98, %7,19, %8,81 ve çıkış gücünü sırasıyla %8,79, %12,32, %14,90 ve %17,98 oranında arttırmıştır. Soltani ve ark. [63], fotovoltaiik TEJ hibrit sisteminde su, hava ve su bazlı SiO_2 ve Fe_3O_4 nanoakışkanlarını değerlendirmişlerdir. Sıvı soğutma yöntemleri, hibrid sistemin toplam gücü için hava soğutma yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde daha iyi sonuçlar elde etmelerini sağlamıştır. Su soğutma yöntemi, doğal soğutma yöntemine kıyasla %47,7 daha fazla güç üretmiştir. Sıvı bazlı yöntemler değerlendirildiğinde, nanoakışkan kullanımında su kullanımına göre daha fazla soğutma performansı ve güç üretimi göstermiştir. SiO_2 ve Fe_3O_4 nanoakışkanları suya göre çıkış gücünü %5,7 oranında arttırmıştır. SiO_2 kullanımı Fe_3O_4 kullanımına göre %0,971 oranında daha fazla güç üretimi sağlamıştır. Rajae ve ark. [64], termal

fotovoltaik (PV/T)-TEJ hibrit sistemi için yeni bir soğutucu olarak su bazlı Co_3O_4 nanoakışkan ve geliştirilmiş faz değişim malzemesini (parafin mumu/alümina tozu) kullanmışlar ve hibrit sistemin performansını analiz etmişlerdir. Su, %0,025, %0,05 ve %0,1 hacim oranlı su bazlı Co_3O_4 ve parafin mumu/ alümina tozu (PCM/ Al_2O_3) kullanmışlardır. Çalışma sıvısı olarak su bazlı Co_3O_4 nanoakışkanın kullanılması, üretilen elektrik gücünü suya kıyasla arttırmıştır. Elektrik gücü, %0,1 hacim oranlı nanoakışkan kullanımı suya kullanımına kıyasla %10,91 oranında artmıştır. Hem PCM hem nanoakışkan kullanımı, toplam elektrik verimliliğini %4,52 oranında arttırmıştır. Selimefendigil ve ark. su, su bazlı MgO/Ag ve CNT nanoakışkanlarını, sıcak ve soğuk akışkan olmak üzere kullanarak TEJ sistemi tasarlamışlardır. Bu akışkanların farklı Reynolds sayılarında TEJ verimine etkisini incelemişlerdir. Ayrıca nanoakışkanları 4 farklı hacim oranında kullanmışlar ve TEJ verimindeki değişiklikleri araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre TEJ verimi, her akışkan için en yüksek değere Reynolds sayısı 1500 alındığında ulaşmıştır. Bu Reynolds sayısında 0,02 hacim oranına sahip MgO/Ag ve CNT nanoakışkan kullanımı, su kullanımına göre TEJ çıkış gücünü sırasıyla %9,74 ve %8,25 oranında arttırmıştır. Ayrıca aynı koşullarda CNT ve MgO/Ag nanoakışkan kullanımı, su kullanımına göre TEJ verimini sırasıyla %13,15 ve %1,53 oranında arttırmıştır.

Literatürde bulunan çalışmalarda nanoakışkanlar genellikle TEJ sisteminde soğutucu akışkan olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda farklı baz akışkan ve nano parçacık ile farklı hacim oranlarında nanoakışkanlar kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarla sıcaklık, kullanılan parçacık tipi ve baz akışkan, hacim oranı gibi parametreler değişiklik gösterse de bir karşılaştırma yapıldığında CNT nanoakışkan kullanımı TEJ veriminde diğer nanoakışkanlara göre daha belirgin bir artış göstermiştir. MgO/Ag nanoakışkan kullanımı özellikle TEJ çıkış gücünde suya göre yüksek değerler elde etmemizi sağlamıştır.

Daha önce yapılan araştırmalar ve tasarladığımız modelde elde ettiğimiz sonuçlar nanoakışkan kullanımının TEJ sisteminin performansını arttırdığını göstermiştir. Nanoakışkanın hacim oranı arttıkça genellikle sistemin performansı da artmıştır. Ancak TEJ sisteminde, çalışma sıvısı olarak kullanılan farklı nanoakışkanlar TEJ sistem performansında farklı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Farklı Reynolds sayılarında da performans değişiklik göstermiştir. Tüm bunlar göz önüne alındığında farklı nanoakışkanlar farklı hacim oranlarında kullanılarak, farklı Reynolds sayılarında

değerlendirilerek, akışkan akış özellikleri ve ısı transfer performansları iyileştirilerek tasarladığımız TEJ sistemi geliştirilebilir. Bunların yanı sıra termoelektrik jeneratör performansı, bu cihazı etkileyen, TE ayak geometrisi, kullanılan TE malzeme, TEM sayısı, sıcaklık farkı gibi temel parametrelerle de optimize edilebilir.



KAYNAKLAR

1. Lozano, Adolfo. Analysis of a Novel Thermoelectric Generator in the Built Environment. The University of Texas, Master of Science in Engineering, Austin, 2011, 249. (Yüksek Lisans Tezi).
2. Liu, S., Hu, B., Liu, D., Li, F., Li, J.-F., Li, B., Li, L., Lin Y.-H., Nan, C.-W. Micro-Thermoelectric Generators Based on Through Glass Pillars with High Output Voltage Enabled by Large Temperature Difference. *Applied Energy*. 2018, 225, 600–610.
3. Chen, X., Yang, Z., Yu, W., Wang, R. Modeling and Experimental Study of a BiSbTeSe-Based Thermoelectric Module for Thermal Energy Recovery. *Journal of Electronic Materials*. 2020, 49, 3039–3051.
4. Shittu, S., Li, G., Zhao, X., Ma, X., Akhlaghi, Y. G., Ayodele, E. High Performance and Thermal Stress Analysis of a Segmented Annular Thermoelectric Generator. *Energy Conversion and Management*. 2019, 184, 180–193.
5. Hiranandani, K., Aravind, B., Ratna Kishore, V., Kumar, S. Development of a Numerical Model for Performance Prediction of an Integrated Microcombustor-Thermoelectric Power Generator. *Energy*. 2019, 192, 116624.
6. Zhao, Y., Wang, S., Ge, M., Liang, Z., Liang, Y., Li, Y. Performance Investigation of an Intermediate Fluid Thermoelectric Generator for Automobile Exhaust Waste Heat Recovery. *Applied Energy*. 2019, 239, 425–433.
7. Lv, S., Liu, M., He, W., Li, X., Gong, W., Shen, S. Study of Thermal Insulation Materials Influence on the Performance of Thermoelectric Generators by Creating a Significant Effective Temperature Difference. *Energy Conversion and Management*. 2020, 207, 112516.
8. Sunawar, A., Garniwa, I., Hudaya, C. The characteristics of Heat Inside a Parked Car as Energy Source for Thermoelectric Generators. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2019, 10, 347–356.
9. Omar, M. S., Singh, B., Remeli M. F. Motorcycle Waste Heat Energy Harvesting Using Thermoelectric Generators. *Journal of Electronic Materials*. 2019, 49, 2838–2845.
10. Punin, W., Maneewan, S., Punlek, C. Heat transfer characteristics of a thermoelectric power generator system for low-grade waste heat recovery from the sugar industry. *Heat and Mass Transfer*. 2018, 55, 979–991.
11. Sheikh, R., Gholampour, S., Fallahsohi, H., Goodarzi, M., Mohammad Taheri, M., Bagheri, M. Improving the efficiency of an exhaust thermoelectric generator based on changes in the baffle distribution of the heat exchanger. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020, 11.
12. Big-Alabo, A. Experimental Analysis of p-n Ge/SiGe-Based Thermoelectric Generators. *Journal of Electronic Materials*. 2019, 48, 3115–3121.
13. Kober, M. Holistic Development of Thermoelectric Generators for Automotive Applications. *Journal of Electronic Materials*. 2020, 49, 2910–2919.

14. Liu, Y., Mu, E., Wu, Z., Che, Z., Sun, F., Fu, X., Wang, F., Wang, X., Wang, Z., Hu, Z. Ultrathin MEMS Thermoelectric Generator with Bi_2Te_3 /(Pt,Au) Multilayers and Sb_2Te_3 legs. *Nano Convergence*. 2020, 7, 8.
15. Mehmood, T., Kim, J. H., Lee, D.-J., Dizhur, S., Hirst, E. S., Osgood R. M., Sayyad, M. H., Munawar, M. A., Xu, J. A flexible, Printable, Thin-Film Thermoelectric Generator Based on Reduced Graphene oxide–Carbon nanotubes Composites. *Journal of Materials Science*. 2020, 55, 10572–10581.
16. Wang, R., Meng, Z., Luo, D., Yu, W., Zhou, W. A Comprehensive Study on X-Type Thermoelectric Generator Modules. *Journal of Electronic Materials*. 2020, 49, 4343–4354.
17. Garud, K. S., Seo, J.-H., Patil, M. S., Bang, Y.-M., Pyo, Y.-D., Cho, C.-P., Lee, M.-Y. Thermal–electrical–structural performances of hot heat exchanger with different internal fins of thermoelectric generator for low power generation application. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020, 33.
18. Guo, X., Zhang, H., Wang, J., Zhao, J., Wang, F., Miao, H., Yuan, J., Hou, S. A. New hybrid system composed of high-temperature proton exchange fuel cell and two-stage thermoelectric generator with Thomson effect: Energy and exergy analyses. *Energy*. 2020, 195, 117000.
19. Yang, K., Cho, K., Yang, S., Park, Y., Kim, S. A laterally designed all-in-one energy device using a thermoelectric generator-coupled micro supercapacitor. *Nano Energy*. 2019, 60, 667-672.
20. Contento, G., Lorenzi, B., Rizzo, A., Narducci, D. Simultaneous materials and layout optimization of non-imaging optically concentrated solar thermoelectric generators. *Energy*. 2020, 194, 116867.
21. Bharti, M., Jha, P., Singh, A., Chauhan, A. K., Mishra, S., Yamazoe, M., Debnath, A. K., Marumoto K., Muthe, K. P., Aswal, D. K. Scalable free-standing polypyrrole films for wrist-band type flexible thermoelectric power generator. *Energy*. 2019, 176, 853-860.
22. Al-Nimr M. A., Tashtoush B., Hasan A. A novel hybrid solar ejector cooling system with thermoelectric generators. *Energy*. 2020, 198, 117318.
23. Fu, P., Qin, W., Bai, S., Yang, D., Chen, L., Guo, X., Li, C. Integrating large-area perovskite solar module with thermoelectric generator for enhanced and stable power output. *Nano Energy*. 2019, 65, 104009.
24. Elankovan, R., Suresh, S., Karthick, K., Hussain, M. M. M. D., Chandramohan, V. P. Evaluation of thermoelectric power generated through waste heat recovery from long ducts and different thermal system configurations. *Energy*. 2019, 185, 477-491.
25. Marefati, M., Mehrpooya, M. Introducing and investigation of a combined molten carbonate fuel cell, thermoelectric generator, linear fresnel solar reflector and power turbine combined heating and power process. *Journal of Cleaner Production*. 2019, 240, 118247.
26. Ejenakevwe, K. A., Mgbemene, C. A., Njoku, H. O., Ekechukwu, O. V. Parametric Optimization of Exergy Efficiency in Solar Thermoelectric Generators. *Journal of Electronic Materials*. 2020, 49, 3063–3071.

27. Karalis, G., Tzounis, L., Lambrou, E., Gergidis, L. N., Paipetis, A. S. A carbon fiber thermoelectric generator integrated as a lamina within an 8-ply laminate epoxy composite: Efficient thermal energy harvesting by advanced structural materials. *Applied Energy*. 2019, 253, 113512.
28. Haiping, C., Jiguang, H., Heng, Z., Kai, L., Haowen, L., Shuangyin, L. Experimental investigation of a novel low concentrating photovoltaic/thermal–thermoelectric generator hybrid system. *Energy*. 2018, 166, 83-95.
29. Xu, Z., Li, J., Tang, X., Liu, Y., Jiang, T., Yuan, Z., Liu, K. Electrodeposition preparation and optimization of fan-shaped miniaturized radioisotope thermoelectric generator. *Energy*. 2020, 194, 116873.
30. Bellos, E., Tzivanidis, C. Investigation of a nanofluid-based concentrating thermal photovoltaic with a parabolic reflector. *Energy Conversion and Management*. 2019, 180, 171–182.
31. Hassan, A., Wahab, A., Qasim, M. A., Janjua, M. M., Ali, M. A., Ali, H. M., Jadoon, T. R., Ali, E., Raza A., Javaid, N. Thermal Management and Uniform Temperature Regulation of Photovoltaic Modules Using Hybrid Phase Change Materials-Nanofluids System. *Renewable Energy*. 2020, 145, 282-293.
32. Najafi, G., Hoseini, S. S., De Goey, L. P. H., Yusaf, T. Optimization of combustion in micro combined heat and power (mCHP) system with the biomass-Stirling engine using SiO₂ and Al₂O₃ nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. 2020, 169, 114936.
33. Li, X., Chen, W., Zou, C. An experimental study on β -cyclodextrin modified carbon nanotubes nanofluids for the direct absorption solar collector (DASC): Specific heat capacity and photo-thermal conversion performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2020, 204, 110240.
34. Pourfayaz, F., Imani, M., Mehrpooya, M., Shirmohammadi, R. Process development and exergy analysis of a novel hybrid fuel cell-absorption refrigeration system utilizing nanofluid as the absorbent liquid. *International Journal of Refrigeration*. 2019, 97, 31-41.
35. Chen, Z., Zheng, D., Wang, J., Chen, L., Sundén, B. Experimental investigation on heat transfer characteristics of various nanofluids in an indoor electric heater. *Renewable Energy*. 2020, 147, Part 1, 1011-1018.
36. Islam, R., Shabani, B. Prediction of electrical conductivity of TiO₂ water and ethylene glycol-based nanofluids for cooling application in low temperature PEM fuel cells. *Energy Procedia*. 2019, 160, 550–557.
37. Zhu, G., Wang, L., Bing, N., Xie, H., Yu, W. Enhancement of photothermal conversion performance using nanofluids based on bimetallic Ag-Au alloys in nitrogen-doped graphitic polyhedrons. *Energy*. 2019, 183, 747-755.
38. Said, Z., El Haj Assad, M., Hachicha, A. A., Bellos, E., Abdelkareem, M. A., Alazaizeh, D. Z., Yousef, B. A. A. Enhancing the performance of automotive radiators using nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, 112, 183–194.
39. Beigzadeh, M., Pourfayaz, F., Ahmadi, M. H. Modeling and Improvement of Solid Oxide Fuel Cell-Single Effect Absorption Chiller Hybrid System by Using Nanofluids as Heat Transporters. *Applied Thermal Engineering*. 2020, 166, 114707.

40. Nithiyantham, U., González-Fernández, L., Grosu, Y., Zaki, A., Igartua, J. M., Faik, A. Shape effect of Al₂O₃ nanoparticles on the thermophysical properties and viscosity of molten salt nanofluids for TES application at CSP plants. *Applied Thermal Engineering*. 2020, 169, 114942.
41. Abdallah, S. R., Saidani-Scott, H., Abdellatif, O. E. Performance analysis for hybrid PV/T system using low concentration MWCNT (water-based) nanofluid. *Solar Energy*. 2019, 181, 108–115.
42. Huaxu, L., Fuqiang, W., Dong, Z., Ziming, C., Chuanxin, Z., Bo, L., Huijin, X. Experimental investigation of cost-effective ZnO nanofluid based spectral splitting CPV/T system. *Energy*. 2020, 194, 116913.
43. Al-Waeli, A. H. A., Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Sopian, K. Experimental investigation of using nano-PCM/nanofluid on a photovoltaic thermal system (PVT): technical and economic study. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2019, 11, 213-230.
44. Jia, Y., Ran, F., Zhu, C., Fang, G. Numerical analysis of photovoltaic-thermal collector using nanofluid as a coolant. *Solar Energy*. 2020, 196, 625–636.
45. Salem Ahmed, M., Mimi Elsaid, A. Effect of Hybrid and Single Nanofluids on the Performance Characteristics of Chilled Water Air Conditioning System. *Applied Thermal Engineering*. 2019, 163, 114398.
46. Rahmanian, S., Hamzavi, A. Effects of pump power on performance analysis of photovoltaic thermal system using CNT nanofluid. *Solar Energy*. 2020, 201, 787–797.
47. Choudhary, S., Sachdeva, A., Kumar, P. Investigation of the stability of MgO nanofluid and its effect on the thermal performance of flat plate solar collector. *Renewable Energy*. 2020, 147, 1801-1814.
48. Tong, Y., Boldoo, T., Ham, J., Cho, H. Improvement of photo-thermal energy conversion performance of MWCNT/Fe₃O₄ hybrid nanofluid compared to Fe₃O₄ nanofluid. *Energy*. 2020, 196, 117086.
49. Nazari, S., Safarzadeh, H., Bahiraei, M. Experimental and analytical investigations of productivity, energy and exergy efficiency of a single slope solar still enhanced with thermoelectric channel and nanofluid. *Renewable Energy*. 2019, 135, 729-744.
50. Selimefendigil, F., Öztop, H. F. Control of natural convection in a CNT-water nanofluid filled 3D cavity by using an inner T-shaped obstacle and thermoelectric cooler. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020, 169, 105104.
51. Cárdenas Contreras, E. M., Oliveira, G. A., Bandarra Filho, E. P. Experimental analysis of the thermohydraulic performance of graphene and silver nanofluids in automotive cooling systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, 132, 375–387.
52. Zakaria, I. A., Mohamed, W. A. N. W., Zailan, M. B., Azmi, W. H. Experimental analysis of SiO₂-Distilled water nanofluids in a Polymer Electrolyte Membrane fuel cell parallel channel cooling plate. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019, 44, 25850-25862.

53. Alshaheen, A. A. S., Kianifar A., Rahimi A. B. Experimental study of using nano-(GNP, MWCNT, and SWCNT)/water to investigate the performance of a PVT module. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020, 139, 3549–3561.
54. Salari, A., Kazemian, A., Ma, T., Hakkaki-Fard, A., Peng, J. Nanofluid based photovoltaic thermal systems integrated with phase change materials: Numerical simulation and thermodynamic analysis. *Energy Conversion and Management*. 2020, 205, 112384.
55. Nasef, H. A., Nada, S. A., Hassan, H. Integrative passive and active cooling system using PCM and nanofluid for thermal regulation of concentrated photovoltaic solar cells. *Energy Conversion and Management*. 2019, 199, 112065.
56. Ghodbane, M., Said, Z., Hachicha, A. A., Boumeddane, B. Performance assessment of linear Fresnel solar reflector using MWCNTs/DW nanofluids. *Renewable Energy*. 2020, 151, 43-56.
57. Li, Y., Wu, Z., Xie, H., Xing, J., Mao, J., Wang, Y., Li, Z. Study on the performance of TEG with heat transfer enhancement using graphene-water nanofluid for a TEG cooling system. *Science China Technological Sciences*. 2017, 60, 1168–1174.
58. Zhou, S., Sammakia, B. G., White, B., Borgesen, P., Chen, C. Multiscale modeling of Thermoelectric Generators for conversion performance enhancement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015, 81, 639–645.
59. Karana, D. R., Sahoo, R. R. Effect on TEG performance for waste heat recovery of automobiles using MgO and ZnO nanofluid coolants. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018, 12, 358–364.
60. Li, Z., Li, W., Chen, Z. Performance Analysis of Thermoelectric Based Automotive Waste Heat Recovery System with Nanofluid Coolant. *Energies*. 2017, 10, 1489.
61. Xing, J., Wu, Z., Xie, H., Wang, Y., Li, Y., Mao, J. Performance of thermoelectric generator with graphene nanofluid cooling. *Chinese Physics B*. 2017, 26, 104401.
62. Abd El-Samie, M. M., Shedid, M. H., Hassan, M. A. M. Numerical study of a solar thermoelectric generator with nanofluids based microcooling system. *Numerical Heat Transfer*. 2018, 74, 1804-1826.
63. Soltani, S., Kasaeian, A., Sarrafha, H., Wen, D. An experimental investigation of a hybrid photovoltaic/thermoelectric system with nanofluid application. *Solar Energy*. 2017, 155, 1033–1043.
64. Rajaei, F., Rad, M. A. V., Kasaeian, A., Mahian, O., Yan, W.-M. Experimental analysis of a photovoltaic/thermoelectric generator using cobalt oxide nanofluid and phase change material heat sink. *Energy Conversion and Management*. 2020, 212, 112780.
65. Zhang, X., Zhao, L.-D. Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity. *Journal of Materiomics*. 2015, 1(2), 92–105.
66. Choi, W., Abrahamson, J. T., Strano, J. M., Strano, M. S. Carbon nanotube-guided thermopower waves. *Materials Today*. 2010, 13(10), 22–33.

67. Saadi, Zakaria. Thermoelectric Generator based on Carbon nanotubes. University of Surrey, Department of Electronic Engineering Faculty of Engineering and Physical Sciences, Guildford, 2018, 182. (Doktora Tezi).
68. Prasad, A., Thiagarajan, R. Multiphysics modelling and multilevel optimization of thermoelectric generator for waste heat recovery. ATOA Scientific Technologies. 2018,7.
69. Aimable, Ngendahayo. Design, modeling, and fabrication of thermoelectric generator for waste heat recovery in local process industry. University of Agder, Faculty of Engineering and Science Department of Engineering, Norway, 2017, 105. (Yüksek Lisans Tezi).
70. Pham, Hoang Ngan. Design and Optimization of Effective Segmented Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery. Technical University of Denmark, Roskilde, 2015, 125. (Doktora Tezi).
71. Tritt, T. M. Thermoelectric Materials: Principles, Structure, Properties, and Applications. Encyclopedia of Materials: Science and Technology. 2002, 1–11.
72. Odia, Ameze. Ge/SiGe-based thermoelectric generator. University of Glasgow, Scotland, UK, 2017, 176. (Doktora Tezi).
73. Montecucco, Andrea. Efficiently Maximising Power Generation from Thermoelectric Generators. University of Glasgow, Scotland, UK, 2014, 189. (Doktora Tezi).
74. Höglblom, Olle. Multiscale Simulation Methods for Thermoelectric Generators. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2016, 81. (Doktora Tezi).
75. Apertet, Y., Goupil, C. On the fundamental aspect of the first Kelvin's relation in thermoelectricity. International Journal of Thermal Sciences. 2016, 104, 225–227.
76. <https://www.slideshare.net/AmanAnand8/thermoelectric-generation-using-waste-heat>
77. <https://www.slideshare.net/jiyadhksabeer/thermoelectric-generators-seminar-ieee>
78. Mirmanto, M., Syahrul, S., Wirdan, Y. Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2019, 22, 177-184.
79. Terasaki, I. Thermal Conductivity and Thermoelectric Power of Semiconductors. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 206, 40.
80. Manikandan, S., Kaushik, S. C. Energy and exergy analysis of solar heat pipe based annular thermoelectric generator system. Solar Energy. 2016, 135, 569–577.
81. Ma, Q., Fang, H., Zhang, M. Theoretical analysis and design optimization of thermoelectric generator. Applied Thermal Engineering. 2017, 127, 758–764.
82. Dhoopagunta, Shripad. Analytical Modeling and Numerical Simulation of a Thermoelectric Generator Including Contact Resistances. Western Michigan University, Michigan, USA, 2016,88. (Yüksek Lisans Tezi).
83. Champier, D. Thermoelectric Generators: A Review of Present and Future

Applications. 3rd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials. 2016, 203-212.

84. Twombly, Chris. A Study of Thermoelectric Properties of Graphene Materials. Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines, 106. (Yüksek Lisans Tezi)

85. Liu, W., Kim, H. S., Jie, Q., Ren, Z. Importance of high power factor in thermoelectric materials for power generation application: A perspective. Scripta Materialia. 2016, 111, 3–9.

86. Muto, Andrew. Thermoelectric Device Characterization and Solar Thermoelectric System Modeling. Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2011, 155. (Doktora Tezi).

87. Fitriani, Ovik, R., Long, B. D., Barma, M. C., Riaz, M., Sabri, M. F. M., Said, S.M. Saidur, R. A review on nanostructures of high-temperature thermoelectric materials for waste heat recovery. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, 64, 635–659.

88. Gayner, C., Kar, K. K. Recent advances in thermoelectric materials. Progress in Materials Science. 2016, 83, 330–382.

89. Ghafouri, Niloufar. Bismuth Telluride and Antimony Telluride Based Co-evaporated Thermoelectric Thin Films: Technology, Characterization, and Optimization. University of Michigan, 2012, 165. (Doktora Tezi).

90. Rowe, D. M. Recent developments in thermoelectric materials. Applied Energy. 1986, 24, 139-162.

91. Rowe, D. M. Recent developments in thermoelectric materials. Applied Energy. 1986, 24, 139-162.

92. Beretta, D., Neophytou, N., Hodges, J. M., Kanatzidis, M. G., Narducci, D., Martin- Gonzalez, M., Beekman, M., Balke, B., Ceretti, G., Wolfgang, T., Zevalkink, A., Hofmann, A., Müller, C., Dörfling, B., Campoy-Quiles, M., Caironi, M. Thermoelectrics: From history, a window to the future. Materials Science and Engineering: R: Reports. 2019, 138, 100501.

93. Huen, P., Daoud, W. A. Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017, 72, 1295–1302.

94. Goldsmid, H. J. Introduction to Thermoelectricity. Springer Series in Materials Science, 2010, 121, 250.

95. Goldsmid, H. J. Bismuth Telluride and Its Alloys as Materials for Thermoelectric Generation. Materials. 2014, 7, 2577-2592.

96. <https://byjus.com/physics/what-are-energy-bands/>

97. Hofmann, A. I., Kroon, R., Müller, C. Doping and processing of organic semiconductors for plastic thermoelectrics. Handbook of Organic Materials for Electronic and Photonic Devices. 2019, 429–449.

98. <https://pediaa.com/difference-between-p-type-and-n-type-semiconductor/>

99. Wang, Luyang. Development and Analysis of Improved Thermoelectric Materials. Ohio State University, 2018, 42.
100. Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F., Ismail, M. A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. *Energy*. 2019, 24.
101. <http://chemgroups.northwestern.edu/kanatzidis/greatthermo.html>
102. El-Adl, A. S., Mousa, M. G., Hegazi, A. A. Performance analysis of a passively cooled thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management*. 2018, 173, 399–411.
103. Chen, M., Rosendahl, L. A., Condra, T. A three-dimensional numerical model of thermoelectric generators in fluid power systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011, 54(1-3), 345–355.
104. LeBlanc, S. Thermoelectric generators: Linking material properties and systems engineering for waste heat recovery applications. *Sustainable Materials and Technologies*. 2014, 1-2, 26–35.
105. <http://www.elektrik.gen.tr/2015/08/termoelektrik-jenerator/645>
106. Tappura, K., Juntunen, T., Jaakkola, K., Ruoho, M., Tittonen, I., Ritasalo, R., Pudas, M. Large-area implementation and critical evaluation of the material and fabrication aspects of a thin-film thermoelectric generator based on aluminum-doped zinc oxide. *Renewable Energy*. 2020, 147, 1292–1298.
107. He, W., Zhang, G., Zhang, X., Ji, J., Li, G., Zhao, X. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied Energy*. 2015, 143, 1–25.
108. Singh, B., Gomes, J., Tan, L., Date, A., Akbarzadeh, A. Small Scale Power Generation using Low Grade Heat from Solar Pond. *Procedia Engineering*. 2012, 49, 50–56.
109. Hofmann, A. I., Kronm, R., Müller, C. Doping and processing of organic semiconductors for plastic thermoelectrics. *Handbook of Organic Materials for Electronic and Photonic Devices*. 2019, 429-449.
110. Eyddan Hamil, Ali. Modeling, Optimizing and Testing Thermoelectric Generators for Liquid-to-Liquid Low Grade Waste Heat Recovery. Western Michigan University, 2016, 78.
111. Montecucco, A., Siviter, J., Knox, A. R. The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel. *Applied Energy*. 2014, 123, 47–54.
112. Lan, S., Yang, Z., Chen, R., & Stobart, R. A dynamic model for thermoelectric generator applied to vehicle waste heat recovery. *Applied Energy*. 2018, 210, 327–338.
113. Mostafavi, S. A., Mahmoudi, M. Modeling and fabricating a prototype of a thermoelectric generator system of heat energy recovery from hot exhaust gases and evaluating the effects of important system parameters. *Applied Thermal Engineering*. 2018, 132, 624–636.

114. Kolesar, Edward S. Jr., Captain, USAF. *Thermoelectric Cooling: Review and Application*, 1981, 76.
115. Bitschi, Andreas. *Modelling of thermoelectric devices for electric power generation*. Technical University of Vienna, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2009, 145. (Doktora Tezi).
116. Al-Habahbeh, O. M., Mohammad, A., Al-khalidi A., Khanfer, M., Obeid, M. Design optimization of a large-scale thermoelectric generator. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2018, 30(2), 177–182.
117. Singh, Gurjinder. *Steady state and transient analysis of thermoelectric devices using finite element method*. Rochester Institute of Technology Rochester, New York, 2003, 135. (Yüksek Lisans Tezi).
118. Bateman, P. J. Thermoelectric power generation. *Contemporary Physics*. 1960, 2, 302-311.
119. Kanimba, E., Tian, Z. A New Dimensionless Number for Thermoelectric Generator Performance. *Applied Thermal Engineering*. 2019, 152, 858-864.
120. Sajid, M., Hassan, I., Rahman, A. An overview of cooling of thermoelectric devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 78, 15–22.
121. Kim, C. N. (2018). Development of a numerical method for the performance analysis of thermoelectric generators with thermal and electric contact resistance. *Applied Thermal Engineering*, 130, 408–417.
122. Seetawan, T., Seetawan, U., Ratchasin, A., Srichai, S., Singsoog, K., Namhongsa, W., Ruttanapun, C., Siridejachai, S. Analysis of Thermoelectric Generator by Finite Element Method. *Procedia Engineering*. 2012, 32, 1006–1011.
123. Elarusi, Abdulmunaem H. *Optimal Design of a Thermoelectric Cooling/Heating System for Car Seat Climate Control*. Western Michigan University, Michigan, 2016, 118. (Yüksek Lisans Tezi).
124. Tawfik, M. M. Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 75, 1239-1253.
125. Bhanvase, B. A., Barai, D. P., Sonawane, S. H., Kumar, N., Sonawane, S. S. Intensified Heat Transfer Rate With the Use of Nanofluids. *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*. 2018, 739-750.
126. Rubio, Joan Iborra. *Nanofluids: Thermophysical Analysis and Heat Transfer Performance*. KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm, 2012, 170. (Yüksek Lisans Tezi).
127. Yu, F., Chen, Y., Liang, X., Xu, J., Lee, C., Liang, Q., Tao, P., Deng, T. Dispersion stability of thermal nanofluids. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2017, 27(5), 531–542.
128. Ghadimi, A., Saidur, R., Metselaar, H. S. C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011, 54(17-18), 4051–4068.

129. Murshed, S. M. S., Estellé, P. A state of the art review on viscosity of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 76, 1134–1152.
130. Vanaki, S. M., Ganesan, P., Mohammed, H. A. Numerical study of convective heat transfer of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, 54, 1212–1239.
131. Babar, H., Ali H. M. Towards hybrid nanofluids: Preparation, thermophysical properties, applications, and challenges. *Journal of Molecular Liquids*. 2019, 281, 598–633.
132. Li, Y., Zhou, J., Tung, S., Schneider, E., Xi, S. A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Technology*. 2009, 196(2), 89–101.
133. Yang, L., Xu, J., Du, K., Zhang, X. Recent developments on viscosity and thermal conductivity of nanofluids. *Powder Technology*. 2017, 317, 348–369.
134. Munyalo, J. M., Zhang, X. Particle size effect on thermophysical properties of nanofluid and nanofluid based phase change materials: A review. *Journal of Molecular Liquids*. 2018, 265, 77–87.
135. Gupta, M., Singh, V., Kumar, R., Said, Z. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 74, 638–670.
136. Iranmanesh, S., Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Ang, B. C., Ong, H. C., Esmaeilzadeh, A. Evaluation of viscosity and thermal conductivity of graphene nanoplatelets nanofluids through a combined experimental–statistical approach using respond surface methodology method. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016, 79, 74–80.
137. Devendiran, D. K., Amirtham, V. A. A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, 60, 21–40.
138. Patel, H. K., Khutey, R. K., Xalxo, C. Preparation and application of nanofluid with microchannel and its experimental and theoretical thermal performance. *IOSR Journal of Engineering*. 2015, 5, 64–80.
139. Simpson, S., Schelfhout, A., Golden, C., Vafaei, S., Nanofluid Thermal Conductivity and Effective Parameters. *Applied Sciences*. 2018, 9(1), 87.
140. Ambreen, T., Kim, M.-H. Influence of particle size on the effective thermal conductivity of nanofluids: A critical review. *Applied Energy*. 2020, 264, 114684.
141. Sergis, Antonis. *Experimental and Numerical Heat Transfer Studies of Nanofluids with an Emphasis on Nuclear Fusion Applications*. Imperial College London, 2013, 218. (Doktora Tezi).
142. Raja, S., Prakash, R., Nandan, G., Muthuraman, M. Pressure drop characteristics and efficiency enhancement by using TiO₂-H₂O nanofluid in a sustainable solar thermal energy collector. *International Journal of Environment and Sustainable Development*. 2018, 17 (2/3).

143. Alawi, O. A., Sidik, N. A. C., Xian, H. W., Kean, T. H., Kazi, S. N. Thermal conductivity and viscosity models of metallic oxides nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, 116, 1314–1325.
144. Ahmadi, M. H., Mirlohi, A., Alhuyi Nazari, M., Ghasempour, R. A review of thermal conductivity of various nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*. 2018, 265, 181–188.
145. Selvakumar, R. D., Wu, J. A comprehensive model for effective density of nanofluids based on particle clustering and interfacial layer formation. *Journal of Molecular Liquids*. 2019, 292, 111415.
146. Buschmann, M. H., Azizian, R., Kempe, T., Juliá, J. E., Martínez-Cuenca, R., Sundén, B., Wu, Z., Seppälä, A., Ala-Nissila, T. Correct interpretation of nanofluid convective heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018, 129, 504–531.
147. Das, P. K., A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*. 2017, 240, 420-446.
148. Sidik, N. A. C., Adamu, I. M., Jamil, M. M., Kefayati, G. H. R., Mamat, R., Najafi, G. Recent progress on hybrid nanofluids in heat transfer applications: A comprehensive review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016, 78, 68–79.
149. Ranga Babu, J. A., Kumar, K. K., Srinivasa Rao, S. State-of-art review on hybrid nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 77, 551–565.
150. Sajid, M. U., Ali, H. M. Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A critical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, 126, 211–234.
151. Hussein, A. A., Al-Kouz, W., Yusop, N., Abdullah, M. Z., Janvekar, A. A. A Brief Survey of Preparation and Heat Transfer Enhancement of Hybrid Nanofluids. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019, 65, 441-453.
152. Jha, N., Ramaprabhu, S. Synthesis and Thermal Conductivity of Copper Nanoparticle Decorated Multiwalled Carbon Nanotubes Based Nanofluids. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2008, 112, 25, 9315–9319.
153. Sheikhzadeh, G. A., Mollamahdi, Mahdi., Abbaszadeh M. Flow field and heat transfer of Ag-MgO/water micropolar hybrid nanofluid in a permeable channel. 2018, *Nano Micro Scales*, 6(1), 13-26.
154. Hemmat Esfe, M., Abbasian Arani, A. A., Rezaie, M., Yan, W.-M., Karimipour, A. Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag–MgO/water hybrid nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2015, 66, 189–195.
155. Uysal, C., Korkmaz, M. E. Estimation of Entropy Generation for Ag-MgO/Water Hybrid Nanofluid Flow through Rectangular Minichannel by Using Artificial Neural Network. *Politeknik Dergisi*. 2019, 22 (1), 41-51.
156. Selimefendigil, F., Chamkha, A. J. MHD mixed convection of Ag–MgO/water nanofluid in a triangular shape partitioned lid-driven square cavity involving a porous compound. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020, 18.

157. Selimefendigil, F., Öztop, H. F. Impact of a rotating cone on forced convection of Ag–MgO/water hybrid nanofluid in a 3D multiple vented T-shaped cavity considering magnetic field effects. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020, 17.
158. Xing, M., Yu, J., Wang, R. Experimental investigation and modelling on the thermal conductivity of CNTs based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016, 104, 404–411.
159. Ghadikolaie, S. S., Hosseinzadeh, K., Ganji, D. D. Numerical study on magnetohydrodynamic CNTs-water nanofluids as a micropolar dusty fluid influenced by non-linear thermal radiation and joule heating effect. *Powder Technology*. 2018, 340, 389-399.
160. Benos, L. T., Karvelas, E. G., Sarris, I. E. A theoretical model for the magnetohydrodynamic natural convection of a CNT-water nanofluid incorporating a renovated Hamilton-Crosser model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, 135, 548–560.
161. <https://uwaterloo.ca/foldvari-group/research-program/drug-delivery>
162. Yazid, M. N. A. W. M., Sidik, N. A. C., Mamat, R., Najafi, G. A review of the impact of preparation on stability of carbon nanotube nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016, 78, 253–263.
163. Esfe, M. H., Naderi, A., Akbari, M., Afrand, M., Karimipour, A. Evaluation of thermal conductivity of COOH-functionalized MWCNTs/water via temperature and solid volume fraction by using experimental data and ANN methods. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015, 121, 1273–1278.
164. Xing, M., Yu, J., Wang, R. Experimental investigation and modelling on the thermal conductivity of CNTs based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016, 104, 404–411.
165. Selimefendigil, F. Mixed convection in a lid-driven cavity filled with single and multiple-walled carbon nanotubes nanofluid having an inner elliptic obstacle. *Propulsion and Power Research*. 2019, 8, 128-137.
166. Selimefendigil, F., & Öztop, H. F. (2019). Corrugated conductive partition effects on MHD free convection of CNT-water nanofluid in a cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 265–277.
167. Y. Ma, R. Mohebbi, M.M Rashidi, Z. Yang. MHD convective heat transfer of Ag-MgO/water hybrid nanofluid in a channel with active heaters and coolers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, 13, 714-726.
168. Khan, W. A., Khan, Z. H., Rahi, M. Fluid flow and heat transfer of carbon nanotubes along a flat plate with Navier slip boundary. *Applied Nanoscience*. 2013, 4(5), 633–641.
169. Pak, BC., Cho, YI. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*. 1998, 11, 151–70.
170. Imtiaz, M., Hayat, T., Alsaedi, A., Ahmad, B. Convective flow of carbon nanotubes between rotating stretchable disks with thermal radiation effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016, 101, 948–957.

171. Xue, Q. Z. Model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites. *Physica B: Condensed Matter*. 2015, 368(1-4), 302–307.
172. Zhou, S., Sammakia, B. G., White, B., Borgesen, P. Multiscale modeling of thermoelectric generators for the optimized conversion performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013, 62, 435–444.
173. Elghool, A., Basrawi, F., Ibrahim, T. K., Habib, K., Ibrahim, H., Idris, D. M. N. D. A review on heat sink for thermo-electric power generation: Classifications and parameters affecting performance. *Energy Conversion and Management*. 2017, 134, 260–277.
174. Khodadadi, H., Aghakhani, S., Majd, H., Kalbasi, R., Wongwises, S., Afrand, M. A comprehensive review on rheological behavior of mono and hybrid nanofluids: Effective parameters and predictive correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, 127, 997–1012.
175. Karthick, K., Suresh, S., Singh, H., Joy, G. C., Dhanuskodi, R. Theoretical and experimental evaluation of thermal interface materials and other influencing parameters for thermoelectric generator system. *Renewable Energy*. 2019, 25-43.
176. Comsol 5.5 User Guide, Heat transfer and AC/DC module.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Damla OKULU
Doğum Yeri ve Yılı : Muğla, 1990
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : damlaokulu@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Köyceğiz Anadolu Lisesi, 2008
Lisans : Karabük Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2015

Mesleki Deneyim

Promta Ltd. Şti.	2015-2016
Adalı A.Ş.	2016-2016