



**NANOAKIŞKAN KULLANIMI İLE FOTOVOLTAİK PANELLERİN
PERFORMANSININ ARTIRILMASI**

İrem KARAASLAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2020

İrem KARAASLAN tarafından hazırlanan “NANOAKIŞKAN KULLANIMI İLE FOTOVOLTAİK PANELLERİN PERFORMANSININ ARTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Tayfun MENLİK

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Karabük Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Mustafa Bahadır ÖZDEMİR

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 31/12/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İrem
KARAASLAN
31/12/2020

NANOAKIŞKAN KULLANIMI İLE FOTOVOLTAİK PANELLERİN PERFORMANSININ
ARTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

İrem KARAASLAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2020

ÖZET

Fotovoltaik termal sistemler (PV/T) sahip olduğu solar hücre ve kolektör sayesinde hem elektrik enerjisi hem de ısı enerjisi eş zamanlı olarak üretebilmesi ile diğer güneş enerji sistemlerinden öne plana çıkmaktadır. Araştırmacıların son on yılda bu sistemlerde elektriksel ve ısı verimliliği artırmak için çalışma akışkanı olarak konvansiyonel akışkanlar yerine tek tip nanoparçacık içeren nanoakışkanları kullanması literatürde yer bulmaktadır. Yapılan çalışmalarda nanoakışkanların bazı olumsuz etkilere de neden olduğu görülmektedir. Son zamanlarda bu sonuçlardan yola çıkarak birden çok nanoparçacık türü içeren hibrit nanoakışkanlar kullanılmaya başlanmıştır. Hibrit nanoakışkan kullanımı ile farklı nanoparçacıkların bireysel olarak sundukları avantaj ve dezavantajların sinerjik etkiler nedeniyle daha iyi bir kombinasyonunun sunulması amaçlanmaktadır. Bu tez çalışmasında yeni bir nanoakışkan türü olan CuO+Fe/su hibrit nanoakışkan kullanımının baz akışkan ve tekli nanoakışkana oranla performans kriterlerine olan etkisi Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği sayısal analiz yöntemi ile araştırılmıştır. ANSYS Fluent 18.2 yazılımı ile yapılan analizlerde çalışma akışkanı olarak %2 (50:50) hacim konsantrasyonunda CuO+Fe/su, CuO/su ve su 1000 W/m^2 sabit ısı akısı altında ve 0,02-0,08 m/s akış hızı aralığında değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda hibrit nanoakışkan kullanımının sistemin elektriksel ve ısı verimi açısından olumlu etkiler sağladığı ancak bunun yanı sıra baz akışkan ve CuO/su' ya oranla basınç düşüşünü de arttırdığı tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 92802
Anahtar Kelimeler : Nanoakışkan, fotovoltaik termal Sistem, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
Sayfa Adedi : 75
Danışman : Prof. Dr. Tayfun MENLİK

ENHANCING THE PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC PANELS BY USING
NANOFLUID

(M. Sc. Thesis)

İrem KARAASLAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2020

ABSTRACT

Photovoltaic thermal systems (PV/T) attract more attention than other solar energy systems with their ability to produce both electrical energy and thermal energy simultaneously with the solar cell and collector. In the last decade, researchers have used nanofluids including a single type of nanoparticle as the working fluid instead of conventional fluids to enhance the electrical and thermal efficiency in these systems. Although nanofluids have some negative effects, promising results are presented for heat transfer mechanisms. Recently, based on these results, hybrid nanofluids containing more than one type of nanoparticle have been used. With the application of hybrid nanofluids, it is aimed to provide a better combination of advantages and disadvantages offered by different nanoparticles individually due to synergistic effects. In this thesis, the effect of using a novel nanofluid, CuO+Fe/water hybrid nanofluid, on performance criteria compared to base fluid and single nanofluid was investigated by using the Computational Fluid Dynamics numerical analysis method. With the help of ANSYS Fluent 18.2 software, % 2 (50:50) volume concentration of CuO + Fe/water, CuO/water and water was analyzed under 1000 W/m^2 constant heat flux and in the range of 0,02-0,08 m/s flow rate. The results showed that the use of hybrid nanofluid provides positive effects in terms of the electrical and thermal efficiency of the system, but also increases the pressure drop compared to the base fluid and CuO/water.

Science Code : 92802

Key Words : Nanofluid, photovoltaic thermal system, Computational Fluid Dynamics

Page Number : 75

Supervisor : Prof. Dr. Tayfun MENLİK

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının oluşmasında konu belirleme aşamasından itibaren tüm süreçlerde bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, her konuda yardım ve desteğini gördüğüm çok değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Tayfun MENLİK' e en içten teşekkürlerimi sunarım. Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak desteklerini esirgemeyen aileme, tez çalışmamda kullandığım ANSYS Fluent yazılımı konusunda benimle tecrübelerini paylaşan ve bilgilerini esirgemeyen Sayın Dr. Öğretim Üyesi Ataollah KHANLARI ve Arş. Gör. Dr. Erdem ÇİFTÇİ' ye ve tez sürecinde bilgisayarım ile ilgili yaşadığım teknik sorunlarda destek veren Emniyet Teşkilatı mensuplarına teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yüksek lisans sürecimin başlangıcından ve 2019 yılı sonrası araştırma görevlisi olarak devam etmesinden bu yana Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm mesai arkadaşlarıma da ilgi ve yardımlarından dolayı şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. PV/T SİSTEMLER	9
3.1. PV/T Sistemlerde Enerji Dengesi	13
4. NANOAKIŞKANLAR	17
4.1. Nanoparçacıkların Sınıflandırılması	18
4.2. Nanoakışkan Özellikleri.....	20
4.2.1. Viskozite	20
4.2.2. Isı iletim katsayısı	22
4.2.3. Yoğunluk.....	24
4.2.4. Özgül ısı kapasitesi	24
4.3. Nanoakışkan Hazırlama Yöntemleri	25
4.3.1. Tek aşamalı yöntem	26
4.3.2. İki aşamalı yöntem.....	26
4.4. Kullanım Alanları.....	27
5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ.....	29

	Sayfa
5.1. HAD Terminolojisi	29
5.2. Temel Eşitlikler	33
5.2.1. Kütlenin korunumu	33
5.2.2. Momentumun korunumu.....	33
5.2.3. Enerjinin Korunumu	34
5.3. HAD Analizinde Uygulanan Adımlar.....	34
5.3.1. HAD geometrisinin oluşturulması	36
5.3.2. Ağ yapısının oluşturulması	39
5.3.3. Sınır şartları.....	41
5.3.4. Sayısal analizin gerçekleştirilmesi	44
5.3.5. Artık değerlerin yakınsaması	45
5.3.6. Sonuçların görüntülenmesi	46
5.4. Ağ Yapısından Bağımsızlık	46
6. HAD ANALİZ SONUÇLARI	49
6.1. Çalışma Akışkanlarında Akışı Etkileyen Özelliklerin Hesaplanması.....	49
6.2. Isıl Verimliliğe Etkisi	51
6.3. Elektriksel Verimliliğe Etkisi.....	57
6.4. Toplam Verime Etkisi	62
6.5. Basınç Düşüşüne Etkisi.....	63
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	75

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Sıcaklık artışının kapalı devre akımı ve açık devre voltajına etkisi	9
Çizelge 4.1. Çeşitli malzemelerin ısı iletim katsayıları	20
Çizelge 5.1. Ağ yapısı elemanlarının karşılıkları.....	30
Çizelge 5.2. Çarpıklık oranı değ er aralıkları.....	31
Çizelge 5.3. Diklik oranı değ er aralıkları.....	32
Çizelge 5.4. Kullanılan malzemelerin özellikleri	38
Çizelge 5.5. Farklı ağ yapılarına ait değ erler	47
Çizelge 6.1. Nanoparçacıkların özellikleri.....	50
Çizelge 6.2. Çalışma akışkanlarının özellikleri	51

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Fotovoltaik termal sistem elemanları.....	10
Şekil 3.2. Farklı fotovoltaik termal sistem tasarımları.....	11
Şekil 3.3. Soğurulan enerji miktarı ve meydana gelen kayıplar	15
Şekil 4.1. Nanoparçacıkların sınıflandırılması.....	19
Şekil 5.1. Ağ yapısı elemanları	30
Şekil 5.2. İdeal ve çarpık eşkenar ve dörtgen	31
Şekil 5.3 (a) Yüzey (b) hücrede diklik değeri için kullanılan vektörler	32
Şekil 5.4. Solar hücrenin yapısı	37
Şekil 5.5. Fotovoltaik termal sistemin sadeleştirilmiş hali	37
Şekil 5.6. Akış kanalının (a) üstten (b) karşıdan görünümü	38
Şekil 5.7. Oluşturulan ağ yapısı	40
Şekil 5.8. Ayırıklaştırılan elemanların diklik değerleri.....	41
Şekil 5.9. Ayırıklaştırılan elemanların çarpıklık değerleri.....	41
Şekil 5.10. Sınır şartları	43
Şekil 5.11. 0,06 m/s akış hızındaki suya ait olan iterasyon sayısı	45
Şekil 6.1. Nanoakışkanların baz akışkana kıyasla termofiziksel özelliklerindeki değişim.....	50
Şekil 6.2. Çıkış sıcaklıklarının farklı akış hızlarındaki değişimi	52
Şekil 6.3. 0,02 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı	53
Şekil 6.4. 0,03 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı	53
Şekil 6.5. 0,04 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı	54
Şekil 6.6. 0,05 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı	54
Şekil 6.7. 0,06 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı	54
Şekil 6.8. 0,07 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı	55
Şekil 6.9. 0,08 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı	55

Şekil	Sayfa
Şekil 6.10. Isıl verimin farklı akış hızlarındaki değişimi.....	57
Şekil 6.11. 0,02 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı.....	58
Şekil 6.12. 0,03 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı.....	58
Şekil 6.13. 0,04 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı.....	59
Şekil 6.14. 0,05 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı.....	59
Şekil 6.15. 0,06 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı.....	59
Şekil 6.16. 0,07 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı.....	60
Şekil 6.17. 0,08 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı.....	60
Şekil 6.18. Solar hücre sıcaklıklarının farklı akış hızlarındaki değişimi	61
Şekil 6.19. Elektriksel verimin farklı akış hızlarındaki değişimi.....	61
Şekil 6.20. Toplam verimin farklı akış hızlarındaki değişimi	63
Şekil 6.21. Basınç farkının farklı akış hızlarındaki değişimi.....	64
Şekil 6.22. 0,08 m/s akış hızı değeri için basınç düşüşü.....	65

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. CuO parçacıklarının SEM görüntüsü.....	17

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A_c	Kolektör alanı, (m^2)
c_p	Özgül ısı kapasitesi, (J/kgK)
F_R	Isı kazanç faktörü
G_t	Gelen toplam güneş enerjisi miktarı, (W/m^2)
h	Isı transfer katsayısı, (W/m^2K)
I_{sc}	Kısa devre akımı, (A)
$\dot{m}$	Kütleli debi, (kg/s)
P	Basınç, (Pa)
ΔP	Basınç düşümü, (Pa)
q	Isı akısı (W/m^2)
Q	Isı transferi, (W)
T	Sıcaklık, (K)
U_L	Toplam ısı kaybı, (W/m^2K)
V_{oc}	Açık devre voltajı, (V)
η_e	Elektriksel verim
η_{th}	Isıl verim
ρ	Yoğunluk, (kg/m^3)
$\tau\alpha$	Geçirgenlik-emicilik çarpımı
φ	Hacim konsantrasyonu
β	Sıcaklık katsayısı, ($1/K$)
μ	Viskozite, (kgm/s)
α	Isı yayılım katsayısı (m^2/s)

Kısaltmalar

Açıklamalar

CAD	Computer Aided Design
------------	-----------------------

Kısaltmalar**Açıklamalar****CFD**

Computational Fluid Dynamics

EVA

Ethylene Vinyl Acetate

MWCNT

Multi-Walled Carbon Nanotube

PV/T

Photovoltaic Thermal System

SEM

Scanner Electron Microscope

1. GİRİŞ

Son yıllarda ısı ve elektrik enerjisi üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı birçok sebep nedeniyle yaygınlaşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelime neden olan esas faktör, fosil kaynakların sera etkisini artırması ve küresel çapta iklim değişikliğine neden olmasıdır. Sera etkisi olmadan dünya yüzeyinin ortalama sıcaklığının mevcut ortalamadan yaklaşık 15 °C daha soğuk olması beklenilmektedir [1]. Sera gazların eksikliği dünya üzerinde canlı yaşamını devam ettiremez hale getirirse de gazların konsantrasyonundaki artış da aynı etkiye sahiptir. Araştırmacılar sera gazı miktarındaki artışın önümüzdeki yüzyılda yeryüzü sıcaklığını 1 °C ile 5 °C arasında artırmasını beklemektedir [2].

Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelime neden olan bir diğer temel etken ise enerji talebindeki artıştır. Gelişmiş ülkelerde enerji talebindeki artışın hem nüfusun dengeli artışından hem de gelişmiş teknolojiler ile daha verimli donanımlar kullanılmasından dolayı neredeyse sabit kalması beklenirken, gelişmekte olan ülkeler için bu durum değişiklik göstermektedir. Bilim ve teknolojiye hızlı ilerlemelerin yol açtığı ekonomik ve sosyal kalkınmalar, yaşam standartlarını arttırmak ile beraber enerji talebinde de giderek artan bir eğilim oluşturmaktadır [3].

Çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, yıllık güneşlenme süresi yeterli olan ülkeler için enerji arzını karşılayabilecek en önemli kaynaklardan biridir. Bu enerjiyi eş zamanlı olarak ısı ve elektrik enerjisine dönüştürmek için fotovoltaiik termal sistemler (PV/T) kullanılmaktadır. Bu sistemlerde temelde bir çalışma akışkanı kullanılarak solar hücre sıcaklığının azaltılması ve ısı transferi aracılığıyla çalışma akışkanının sıcaklığının artırılması hedeflenmektedir. Bu tez çalışmasında da konvansiyonel buhar sıkıştırırmalı çevrimler, mesken soğutma ve ısıtmaları, sıcak kullanım suyu sağlama, temiz su üretimi, kurutma, ısı depolama gibi çeşitli elektrik ve ısı enerji ihtiyacı bulunan sistemlerde kullanılabilen fotovoltaiik termal sistemin performansı, farklı sınır koşullarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak belirlenmiştir [4].

2. LİTERATÜR TARAMASI

Genel olarak su, etilen glikol gibi çalışma akışkanları kullanılan güneş enerjisi sistemlerinde son yıllarda araştırmacılar, konvansiyonel çalışma akışkanlarına kıyasla daha üstün ısı transfer özelliklerine sahip olduğu belirlenen nanoakışkanları incelemeye başlamıştır. Daha fazla ısıyı transfer imkanı sağlayan nanoakışkanlar sistemlerin hem elektriksel hem de ısı verimini arttırmaktadır. Bu bölümde, çeşitli güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan tekli ve hibrit nanoparçacıklardan oluşan nanoakışkan kullanımının performans parametrelerine etkisinin incelendiği sayısal ve deneysel çalışmalar özetlenmiştir.

Khanjari vd. çalışmasında, çalışma akışkanlarının (su, Ag/su ve Al_2O_3 /su) giriş hızı ve nanoparçacık hacimsel konsantrasyonunun fotovoltaiik termal sistem verimliliği ve ısı transferi üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sonuçlar, nanoparçacık hacim konsantrasyonundaki artışın verimi ve ısı transfer katsayısını arttırdığını göstermektedir. Al/su ve Ag/su nanoakışkanları için ısı transfer katsayısındaki maksimum artış sırasıyla % 12 ve % 43' tür. Baz akışkan suya oranla toplam sistem verimindeki artış hacim konsantrasyonu % 1' den % 10' a artarken Al/su için % 0,72 - % 4,26 ve Ag/su için % 1,33 - % 11,54 olmuştur [5].

Sardarabadi ve Passandideh-Fard çalışmasında baz akışkanı su olan Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO nanoparçacıklarından oluşan farklı tip metal oksitlerin fotovoltaiik termal sistemde değerlendirilmesi yapılmıştır. Sayısal ve deneysel olarak sürdürülen çalışmada PV panel ve PV/T sistem karşılaştırılmıştır. Fotovoltaiik sisteme kıyasla panel yüzey sıcaklığındaki azalma ve elektrik verimliliğindeki artış sırası ile baz akışkan, TiO_2 /su, ZnO/su ve Al_2O_3 /su için maksimum 11 ° C, 11,48 ° C, 11,85 ° C, 11,03 ° C ve % 5,48, % 6,54, % 6,46 ve % 6,36 olarak bulunmuştur. Sayısal modelde seçilen ZnO' nun ağırlıkça % 0,05 - % 10 aralığında fotovoltaiik termal sistem performansı üzerindeki etkisi incelenmiş olup kütle oran arttırıldığında ısı verimliliği dört kat artarken, yüzey sıcaklığının % 2 arttığı ve elektriksel verimin % 0,02 oranında azaldığı tespit edilmiştir [6].

Minea Alina Adriana tarafından nanoparçacıkların termofiziksel özelliklerinin ısı transfer özelliklerine olan etkisini incelemek için deneysel ve sayısal bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmada Al_2O_3 , SiO_2 ve TiO_2 nanoparçacıkları ikili olarak baz akışkan su içerisinde farklı konsantrasyonlarda birleştirilerek hibrit nanoakışkanlar elde edilmiştir. Çalışma, bakır boru

boyunca nanoakışkanların parçacık konsantrasyonu ve Reynolds sayılarının artışına bağlı olarak taşınım katsayılarının da arttığını ortaya koymuştur. Hacim konsantrasyonu MHS3 (%2,5 Al_2O_3 + %1,5 SiO_2) için % 4 olduğunda baz akışkana kıyasla ısı transfer katsayısında % 257 artış tespit edilmiştir. Ancak bu koşulların pompalama gücünde ekstra artışa neden olduğu belirtilmiştir [7].

Sardarabadi vd. çalışmasında çalışma akışkanı olarak SiO/su nanoakışkan kullanımının ağırlıkça % 1 ve % 3' lük konsantrasyonlarının fotovoltaiik termal sistemin ısı ve elektriksel verimi üzerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar baz akışkana kıyasla ağırlıkça % 1 ve % 3 SiO/su nanoakışkanı için toplam sistem veriminin sırasıyla % 3,6 ve % 7,9 ve ısı veriminin % 7,6 ve % 12,8 oranında arttığını göstermektedir [8].

Lelea vd. çalışmasında 28 nm ve 47 nm boyutlarında ve % 1, % 3 ve % 5 konsantrasyonunda Al_2O_3 /su kullanımının yoğunlaştırılmış fotovoltaiik sistemlerde sayısal analizi için ANSYS Fluent programı kullanılmıştır. Tek fazlı yaklaşım kullanılan çalışmada performans etkisini gözlemlemek için akış Reynolds sayısına karşılık gelen maksimum temas yüzey sıcaklığı (ısı kaynağı ve soğutma sistemi arasında) ve farklı hacim konsantrasyonu ve parçacık çapı için pompalama gücü karşılaştırılmıştır. Su ve nanoakışkan için sabit çap ve konsantrasyonlarda pompalama gücünde önemli bir fark olmadığı ve % 5 hacim konsantrasyonunda nanoakışkanın sudan daha düşük bir temas yüzey sıcaklığına sahip olduğunu gözlemlenmiştir [9].

Younis vd. çalışmasında fotovoltaiik termal sistemde Al_2O_3 +ZnO/su hibrit nanoakışkan kullanımı deneysel ve sayısal olarak inceleyerek, termodinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Kullanılan nanoakışkan baz akışkan olarak su ve parçacık boyutu 5 nm olan ağırlıkça % 0,05 Al_2O_3 ile parçacık boyutu 10-30 nm olan ağırlıkça % 0,05 ZnO nanoparçacıklarından oluşmaktadır. Baz akışkana kıyasla hibrit nanoakışkanın toplam verimlilikte % 4,1 ve ekserji verimliliğinde % 4,6 artış sağladığı gözlemlenmiştir. Solar hücre sıcaklığında ise sadece 0,65 °C' lik bir soğuma gerçekleşmiştir. [10].

Verma vd. çalışmasında düzlemsel güneş kolektöründe su bazlı farklı nanoparçacıklardan oluşan hibrit nanoakışkanların sistem performansına etkisi gözlemlenmek için deneysel bir çalışma yürütülmüşlerdir. Mevcut çalışmada nanoparçacık olarak çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ile CuO ve MgO' dan oluşan hibrit nanoakışkanların % 0,25 - % 2,0

değişen konsantrasyonlarda ve 0,5 l/dk - 2,0 l/dk akış hızlarında değerlendirilmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar optimum değere % 0,75-% 1 hacim konsantrasyonu ve 0,025-0,03 kg/s debi aralığında ulaşıldığını göstermektedir. MgO ile oluşturulan hibrit nanoakışkanın sağladığı ekserji ve enerji verimliliği sırasıyla % 71,54 ve % 70,55 olurken bu değerler CuO için % 70,63 ve % 69,11 olarak bulunmuştur [11].

Rangababu vd. çalışmasında gerçekleştirilen sayısal analizde, düzlemsel güneş kolektöründe çalışma akışkanı olarak baz akışkanı su olan Al_2O_3 ve CuO nanoakışkanlarının ısı transfer performansları incelenmiştir. CuO/su akışkanının ısı transfer katsayısının baz akışkan ve Al_2O_3 /su ile kıyaslandığında daha yüksek olduğu ve buna bağlı olarak kolektör veriminde sırasıyla % 22 ve % 8 oranında iyileşme sağladığı görülmüştür [12].

Bellos vd. çalışmasında parabolik oluklu güneş kolektöründe Syltherm 800 baz akışkanı ve hacimce %3 Al_2O_3 , %3 TiO_2 , %1,5 Al_2O_3 ve % 1,5 TiO_2 oranlarındaki nanoparçacıklardan oluşan tekli ve hibrit nanoakışkanlar kullanılmıştır. Kolektör performansı olası farklı çalışma sıcaklığı seviyelerini kapsamak için 300K ile 650K arasındaki giriş sıcaklıkları için değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda hibrit nanoakışkanın ısı verimlilik artışı %1,8 olur iken tekli nanoparçacığa sahip nanoakışkanlarda bu değer % 0,7 olarak tespit edilmiştir [13].

Mahato vd. çalışmasında düzlemsel güneş kolektör veriminde artış sağlamak amacıyla 6,5 mm çapa sahip bir boru içerisinden geçen, sabit hızı 1,5 m/s ve baz akışkanı su olan farklı nanoakışkanlar kullanılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yaklaşımı ile yapılan sayısal analizde SiO_2 , Al_2O_3 , Ti_2O , CuO/su akışkanları için Reynolds sayısındaki artış ile birlikte ısı transfer oranının da arttığı ve maksimum çalışma akışkanı sıcaklığının (348K) CuO/su nanoakışkanı kullanımı ile elde edildiği belirlenmiştir [14].

Mirzaei vd. çalışmasında % 0,1 hacim konsantrasyonuna sahip nanoparçacıkların baz akışkan su ile oluşturduğu nanoakışkanların farklı debilerde (1 l/dk, 2 l/dk, 4 l/dk) güneş kolektörü ısı verimine etkisini deneysel olarak araştırılmıştır. CuO, Al_2O_3 , % 25 CuO+ %75 Al_2O_3 , % 75 CuO+ %25 Al_2O_3 , % 50 CuO+ %50 Al_2O_3 karışım oranları için baz akışkana kıyasla verim artışı sırasıyla % 50, % 16, % 15, % 8 ve % 2 bulunmuştur [15].

Taherialekouhi vd. tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada grafen oksit+Al₂O₃ hibrit nanoparçacığının baz akışkan suya eklenmesi ile ısı iletkenlikteki değişim gözlemlenmiştir. Mevcut çalışmada nanoakışkan 25-50°C sıcaklık aralığında ve %0,1-1 arasında değişen hacim konsantrasyonunda (50:50) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sıcaklığın ve hacim konsantrasyonunun maksimum değeri için ısı iletkenlik değerinde % 33,9 artış belirlenmiştir. [16].

Farajzadeh vd. çalışmasında düzlemsel güneş kolektörlerinde çalışma akışkanı olarak TiO₂/su, Al₂O₃/su ve hibrit nanoakışkanlarını 1,5 l/dk, 2 l/dk, 2,5 l/dk hacimsel debilerde kullanımı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre Al₂O₃/su, TiO₂ /su ve bu iki nanoakışkanın hibrit çözeltileri ile ısı verimliliğinde sırasıyla % 19, % 21 ve % 26 iyileşme sağlanmıştır [17].

Gangadevi ve Vinayagam tarafından farklı hacim konsantrasyonlarına sahip (% 0,05, % 0,1, % 0,2) Al₂O₃/su, CuO/su ve Al₂O₃+CuO/su çalışma akışkanlarının fotovoltaiik termal sistem performansına etkisi deneysel bir çalışma ile değerlendirilmiştir. Isı iletkenlik ve viskozite değerlerinin sıcaklık ve hacim konsantrasyonuna bağlı değişimlerinin de incelendiği çalışmada Al₂O₃/su, CuO/su ve Al₂O₃+CuO/su (%2) kullanımı ile % 11,5 % 13,5 ve %15 elektriksel verim elde edilmiştir [18].

Literatür incelendiğinde, çeşitli güneş enerjisi sistemlerinde tekli nanoakışkan kullanımının sistem performansına etkisinin incelendiği çalışmaların mevcut olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra nanoparçacıkların iki veya daha fazla türünden oluşan kombinasyonlarının kullanılması yeni bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Araştırmacılar güneş enerjisi sistemlerinde hibrit nanoakışkanları çoğunlukla güneş kolektöründe kullanarak sistemin ısı verimi üzerine incelemeler gerçekleştirmektedir. Ancak fotovoltaiik termal sistemlerdeki etkisinin (özellikle elektriksel verime olan etkisi) incelendiği çalışmaların kısıtlı olduğu görülmektedir. Araştırmacılar nanoakışkanların daha iyi performans göstereceği konusunda genel bir görüşe sahip olsalar da bunun tam tersi olduğunu gösteren sonuçlar da mevcuttur. Yapılan çalışmalar genel varsayımların her nanoakışkan çeşidi, hacim konsantrasyonu veya akış hızı (dolayısıyla kütleli debisi) için geçerli olmadığını da ortaya koymaktadır. Bahsedilen bu durumlar yeni akışkan türlerinin ısı davranışlarını tespit edebilmek için yeni çalışmalara ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada da yeni bir nanoakışkan türü olan CuO+Fe/su hibrit nanoakışkanının CuO/su tekli nanoakışkanına ve baz akışkan suya

kıyasla sistem performansına etkisi ANSYS Fluent yazılımı aracılığıyla değerlendirilmiştir. CAD programı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu bir geometride yapılan analizde, fotovoltaiik termal sistemler için önemli parametreler olan akışkan çıkış sıcaklığı, fotovoltaiik panel sıcaklığı, elektriksel verim gibi performans ölçütleri hesaplanmıştır.

3. PV/T SİSTEMLER

19. yüzyılın başlarında belirli malzemelere çarpan güneş ışığının algılanabilir elektrik akımı oluşturduğunun gözlemlenmesi araştırmacıları güneş enerjisi alanına yöneltmiştir. 1954 yılında Bell laboratuvarında Chapin ve arkadaşları tarafından ilk solar hücrenin geliştirilmesinin ardından basit yapısı, bakımının kolay olması, yakıt olarak sonsuz güneş kaynağının kullanılması, çevreye zararlı gaz salınımı yapmaması gibi avantajlar ile fotovoltaik sistemler ön plana çıkmıştır. İlk solar hücrenin %6 verime sahip olmasına karşın zaman içerisinde daha verimli solar hücreler geliştirilmeye devam edilmiştir [19].

Yeni solar hücrelerin geliştirilmesinin yanı sıra mevcut sistemlerde verimlilik artışı çalışmaları literatürde geniş yer bulan başka bir konudur. Uygulamada fotovoltaik sistemlerin standart çevre koşullarına kıyasla (1000 W/m^2 güneş ışınımı ve 25°C hücre sıcaklığı) verimlilik oranının daha düşük olması bu sistemleri daha verimli hale dönüştürme çabalarını da beraberinde getirmiştir. Araştırmacılar fotovoltaik panel verimini etkileyen en önemli parametrelerden birinin solar hücre sıcaklığı olduğu konusunda hem fikirdir. Çizelge 3.1’de de görüldüğü üzere yapılan çalışmalara göre fotovoltaik sistemlerde solar hücre sıcaklığındaki artışın, kısa devre akımında (I_{sc}) bir artış sağlamasına rağmen açık devre voltajında (V_{oc}) büyük oranda azalmaya neden olması elektriksel verimin düşmesine yol açmaktadır [20]. Monokristal ve polikristal solar hücreler için verimlilik düşüşü hücre sıcaklığının her 1°C ’lik artışı için % 0,45 olurken, amorf silikon hücreleri için bu değer % 0,25 olmaktadır. Sıcaklık değerinde gerçekleşecek bir azalma elektriksel verimi artırmanın yanı sıra fotovoltaik modülün de ömrünü artırmakta ve akım-gerilim karakteristik eğrisindeki dalgalanmaları azaltmaktadır [21]. Araştırmacılar fotovoltaik termal sistemler aracılığıyla solar hücre sıcaklığını standart çevre koşullarına yakınlaştırmak için fotovoltaik termal sistemleri kullanmaktadır.

Çizelge 3.1. Sıcaklık artışının kapalı devre akımı ve açık devre voltajına etkisi

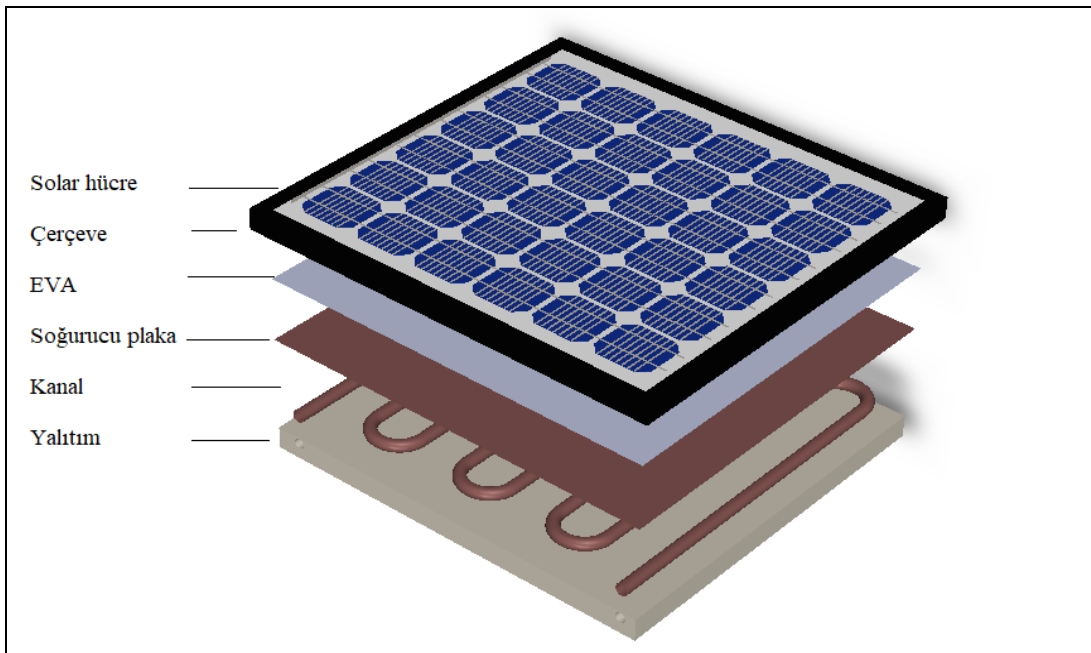
T($^\circ\text{C}$)	I_{sc} (mA)	V_{oc} (mV)	η (%)
20	37,49	663,9	18,34
25	37,50	654,9	17,97
30	37,51	645,9	17,57
35	37,52	635,7	17,17
40	37,52	625,9	16,78
45	37,53	615,9	16,55
50	37,53	606,0	16,16

Çizelge 3.1. (devam) Sıcaklık artışının kapalı devre akımı ve açık devre voltajına etkisi

55	37,54	595,9	15,76
60	37,54	585,8	15,35
65	37,55	575,7	14,94
70	37,55	565,6	14,53
75	37,56	555,4	14,12
80	37,56	545,2	13,71

Fotovoltaik termal sistemler, güneş enerjisini eş zamanlı olarak elektrik ve ısı enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Temel olarak solar hücrelerden oluşan bir plakaya sahip güneş kolektöründen oluşmaktadır. Solar hücreler aracılığıyla güneş ışınımını soğuran sistem elektrik üretmektedir. Ancak güneş ışınımı aynı zamanda sistemde ısı olarak açığa çıkmakta ve fotovoltaik modülün sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Bu sıcaklığın bir kısmı taşınım yoluyla çevre havaya aktarılırken bir kısmı da iletim yoluyla soğurucu plakaya geçmektedir [22].

Kullanılan çalışma akışkanı su ise, kazanılan ısı binaların ısıtılması, sıcak su ihtiyacının karşılanması vb. düşük sıcaklık gerektiren uygulamalarda doğrudan kullanılabilir. Ancak etilen glikol, nanoakışkan gibi özel akışkanlar ise ısı değiştirici kullanılarak akışkandan elde edilen ısı kullanım suyuna aktarılmaktadır. Şekil 3.1’de bu tez çalışması kapsamında tasarlanan fotovoltaik termal sistemin elemanları gösterilmektedir.

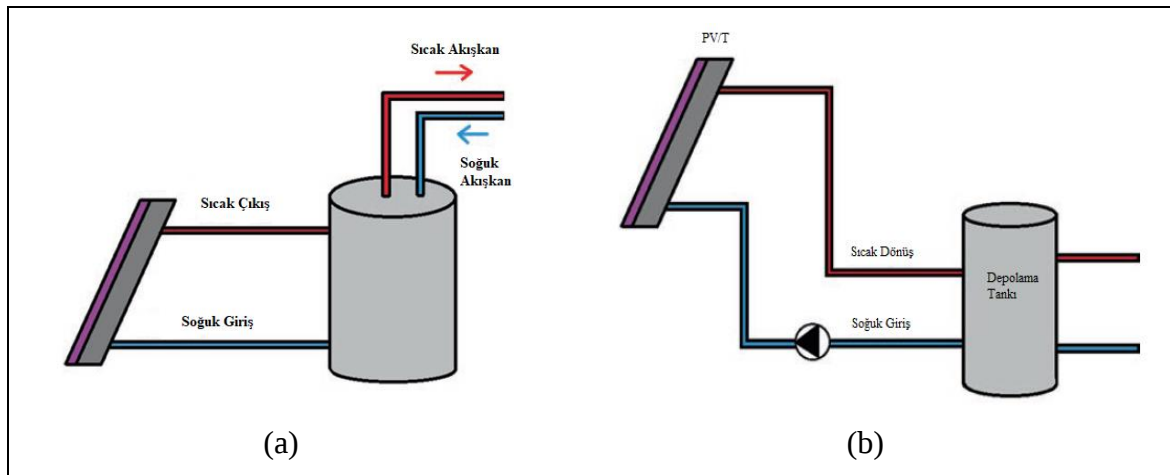


Şekil 3.1. Fotovoltaik termal sistem elemanları

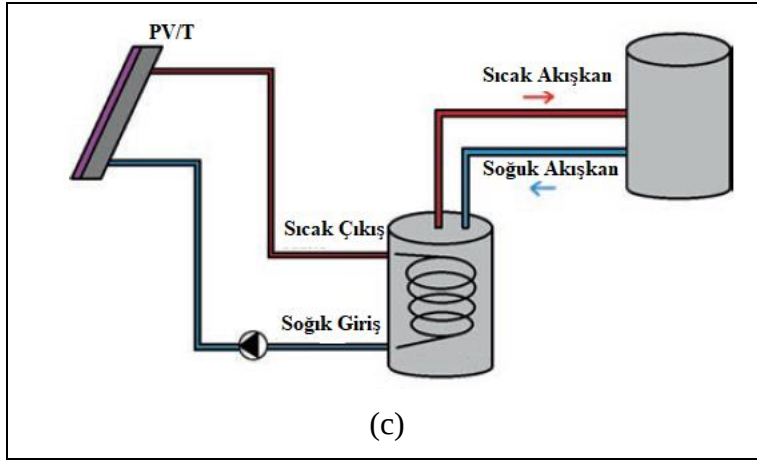
Şekil 3.1’de gösterilen katmanlar aşağıda açıklanmaktadır:

- ✓ Solar hücre: Güneşten gelen ışınının elektriğe dönüştürüldüğü kısımdır. Monokristal, polikristal, amorf silikon vb. maddelerden oluşabilmektedir.
- ✓ EVA: Etilen vinil asetat (EVA) ısı iletkenliği yüksek olan ve parçaları birbirine yapıştıran özel bir katmandır.
- ✓ Soğurucu plaka: Genellikle yüksek ısı iletkenliğine sahip metallerden oluşan soğurucu plaka, fotovoltaik modülün arkasına eklenir. Sadece boruyu temsil edebileceği gibi bazı çalışmalarda soğurucu plaka ve boruyu tanımlamak için kullanılmaktadır. Literatürde farklı geometrilerde ve akış geçiş şekillerinde tasarımları mevcuttur.
- ✓ Kanal: Akışın gerçekleştiği boru bağlantısını temsil etmektedir.
- ✓ Yalıtım: Kolektörün yan kenarları ve arka tarafında bulunan yalıtım, taşınım ve ışınlam ile olan ısı kayıplarını minimum düzeyde tutmak için kullanılır. Isı kayıplarının azalması ısı verimi etkileyen ana parametrelerden biridir.
- ✓ Çerçeve: Tüm kolektör bileşenlerini korumak ve böylece PV/T sistemin doğru çalışmasını sağlamak için kullanılmaktadır [23].

Fotovoltaik termal sistemler de diğer güneş enerjisi sistemleri gibi aktif ve pasif olarak iki grup altında incelenmekte ve doğrudan ve dolaylı sistemler olarak tasarlanabilmektedir. Dolaylı sistemlerde akışkan ısısını ısı değiştirici sayesinde ikinci bir sıvıya aktarırken, doğrudan sistemlerde direk olarak ısınan akışkan kullanılabilmektedir.



Şekil 3.2. Farklı fotovoltaik termal sistem tasarımları



Şekil 3.2. (devam) Farklı fotovoltaik termal sistem tasarımları

Şekil 3.2' de [23] fotovoltaik termal sistemlerin çeşitli tasarımları gösterilmektedir. Pasif sistemlerde akışkan doğal konveksiyon yoluyla dolaşırken, aktif sistemlerde dolaşımı sağlamak amacıyla pompalar ve elektrikli bileşenler kullanılmaktadır. Şekil 3.2 (a) doğrudan pasif bir fotovoltaik termal sistem gösterilirken, Şekil 3.2 (b)'de çalışma akışkanının pompa aracılığıyla dolaştığı doğrudan ve aktif bir sistem, Şekil 3.2 (c)'de ise dolaylı ve aktif bir sistem gösterilmektedir. Şekil 3.2 (b) ve 3.2 (c)' de basitleştirilmiş olarak gösterilen bu sistemler ticari olarak daha karmaşık bileşenler içermektedir.

PV/T sistemlerin başlıca avantajları aşağıda özetlenmiştir:

- ✓ Fotovoltaik sistemler güneş spektrumunda sadece görünür dalga boyunu yakalayıp yararlı enerjiye dönüştürebilmektedir. Ancak güneş kolektörleri kızılötesi dalgaları da soğurabilmektedir. Böylece fotovoltaik modül yerine PV/T sistem kullanılması aynı güneş ışınlamından daha efektif şekilde faydalanılabilmek imkanı oluşturmaktadır.
- ✓ Elektrik enerjisi ve sıcak su ihtiyacı için iki ayrı sistem kurulumu yerine hibrit sistemin kurulumu toplam maliyeti azaltmaktadır.
- ✓ Hibrit sistemler maliyette azalma sağlarken aynı zamanda kurulum için gerekli olan alanı da azaltmaktadır.
- ✓ PV/T sistemler bina çatılarında kullanıldığı yaz aylarında inşaatın da yalıtımını sağlayarak, binanın soğuması için gerekli olan ısı yükü azaltmaktadır.
- ✓ Bina çatı uygulamalarında sağlanan bir diğer avantaj ise ayrı sisteme göre daha iyi bir görsellik sağlayarak görüntü kirliliğini azaltmasıdır.

- ✓ PV/T sistemin sağladığı fotovoltaiik modülün sıcaklığındaki azalma ve daha sabit bir sıcaklık değeri oluşturmaları geleneksel fotovoltaiik modüle kıyasla modülün ömründe iyileştirme sağlamaktadır. Buna bağlı olarak sistem daha uzun süre referans verimini sürdürebilmektedir [23].

Her sistemde olduğu gibi fotovoltaiik termal sistemlerinde avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları mevcuttur. Aşağıda sıralanmakta olan dezavantajlar fazla gibi görünse de gelişmekte olan bu sistemlerin dezavantajlarının yeni teknolojilerle ortadan kaldırılabilceği göz ardı edilmemelidir.

- ✓ Hibrit sistemde elektriksel verim artışı ile optik verimliliği azaltma veya tam tersi arasındaki denge ortadan kaldırılamaz. Eğer düz plakalı bir kolektör fotovoltaiik panel ile kaplıysa ışıınımdaki kayıplar kaçınılmazdır. Aynı şekilde düz plakalı kolektör ön plandaysa burada panel sıcaklığı kolektör işleyişini sağlamak için azaltılabilir.
- ✓ Teorik olarak iki ayrı sistem yerine hibrit bir sistemin kurulum maliyeti daha düşük olsa da, bunun pratikte geçerlilik sağlayabilmesi için üretim yapılan yerde güneş enerjisi endüstrisinin bu teknolojiyi benimsemiş ve uygulamış olması gerekir. Nitekim bu durum her ülkeye göre farklılık göstermektedir.
- ✓ Bir avantaj olarak ele alınan PV/T sistemlerdeki yer tasarrufu imkanı, birleşik sistemin ağırlığını artırdığından kurulacak alan için özellikle çatı uygulamalarında bazı sınırlamalara yol açmaktadır [23].

3.1. PV/T Sistemlerde Enerji Dengesi

Isıl bir sistemin analizi gerçekleştirilirken sistemin verimi, sistemden elde edilen net işin sistemdeki girdiye oranı ile bulunmaktadır. Fotovoltaiik termal sistemler, hibrit sistemler oldukları için hem ısı hem de elektrik enerjisi elde edilmektedir. Bu nedenle sistem verimi, η_{th} ısı verim ve η_e elektriksel verimin birleşimi olarak hesaplanabilmektedir [5].

$$\eta_{sistem} = \eta_{th} + \eta_e \quad (3.1)$$

Fotovoltaiik modülün elektriksel verimi Eş. 3.2 ile hesaplanabilmektedir:

$$\eta_e = \eta_r [1 - \beta(T_{panel} - T_r)] \quad (3.2)$$

Burada η_r referans hücre verimini, T_r referans hücre sıcaklığını (K) ve β ise sıcaklık katsayısını (1/K) temsil etmektedir [24].

Isıl verim, fotovoltaiik termal sistemden elde edilen ısı enerjisinin, sisteme gelen güneş ışınımına oranı ile bulunmaktadır [5]:

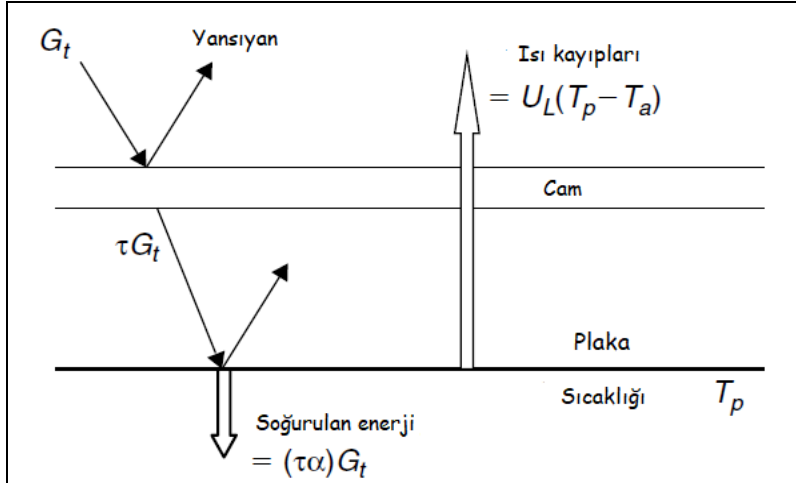
$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{G_t A_c} \quad (3.3)$$

Burada Q_u toplam ısı enerjisi (W), G_t güneş ışınımı (W/m^2) ve A_c kolektör alanını (m^2) temsil etmektedir.

Kolektör yüzeyine belirli bir güneş ışınımı düştüğünde, soğurulan ışınımın bir kısmı çalışma akışkanını gönderilmekte ve faydalanılan enerjiye dönüştürülmektedir. Fakat tüm ısı sistemlerde olduğu gibi çevreyle olan ısı transferi ve buna bağlı olarak enerji kayıpları oluşmaktadır. Kararlı durum koşullarında çalışma akışkanı tarafından soğurulan ısı, güneş kolektörü tarafından soğurulan enerji miktarının, yüzeyden çevreye doğrudan veya dolaylı olarak oluşan ısı kayıplarından farkına eşittir. Şekil 3.3 kolektöre gelen ışınım ve kolektörden oluşan kayıpları şematik olarak göstermektedir. Kolektörden çevreye ısı kayıpları taşınım, iletim ve ışınım ile gerçekleşmektedir. Eş. 3.4’de U_L toplam ısı kaybı katsayısını, T_p soğurucu plaka sıcaklığını, T_a ortam sıcaklığını, T_0 ve T_i sırası ile akışkanın giriş ve çıkış sıcaklığını ve $\dot{m}$ kütleli debisini temsil etmektedir. Bu nedenle kararlı durum şartlarında A_c kolektör alanına sahip bir kolektörden elde edilen enerji:

$$Q_u = A_c [G_t (\tau\alpha) - U_L (T_p - T_a)] = \dot{m} c_p [T_0 - T_i] \quad (3.4)$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir [21].



Şekil 3.3. Soğurulan enerji miktarı ve meydana gelen kayıplar

Şekil 3.3 ile gösterilen modelde basitleştirme yapabilmek adına bazı kabuller yapılmıştır:

1. Kolektör kararlı hal durumundadır.
2. Kolektör ana borusu (header) ve paralel boruları (riser) plakaya sabitlenmiştir.
3. Ana boru küçük bir alana sahip olduğu için göz ardı edilmektedir.
4. Akış üniformdur.
5. Arka yalıtımdan akış tek boyutludur.
6. Gökyüzü siyah cisim olarak düşünülmektedir. Bu yüzden sıcaklığı sonucu etkilememektedir.
7. Borular etrafındaki sıcaklık gradyanı göz ardı edilmektedir.
8. Malzeme özellikleri sıcaklıktan bağımsızdır.
9. Cam tarafından güneş enerjisi soğurulmaz.
10. Cam kızılötesi ışınları geçirmez.
11. Camdaki kirlenme ihmal edilmiştir.
12. Cama gölgeleme yoktur.
13. Camdaki ısı akışı tek boyutludur.
14. Camın neden olduğu sıcaklık düşüşü ihmal edilmektedir.
15. Kolektörün arka ve ön yüzü aynı sıcaklıktadır.

Eş. 3.4'ten farklı olarak F_R ısı kazanç faktörü kullanımı ile ortalama plaka sıcaklığı T_p 'nin yerini akışkanın giriş sıcaklığı olan T_i almaktadır. Akışkanın giriş sıcaklığı tüm ısıtma sistemine, sıcak su talebine ve kullanılacak olan alanın ısıtma yüküne bağlı iken F_R , sadece kolektör özelliklerine, akışkan türüne ve akışkan debisine bağlıdır.

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp \left(\frac{U_L F' A_c}{\dot{m}c_p} \right) \right] \quad (3.5)$$

Eş. 3.3 ve Eş. 3.4 ile gösterilen ısı verim ve elde edilen enerji eşitlikleri ısı kazanç faktörü dahil edilerek tekrar düzenlendiğinde eşitlikler:

$$\eta_{th} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G_t} \quad (3.6)$$

ve

$$Q_u = A_c F_R [G_t(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (3.7)$$

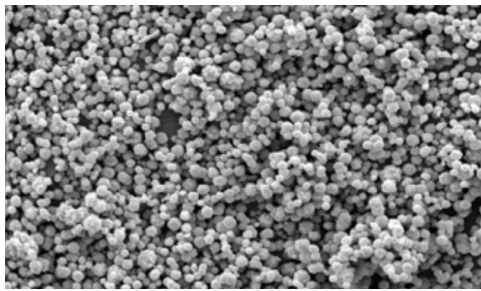
haline gelmektedir.

Eş. 3.6' da görüldüğü gibi çalışma akışkanının giriş sıcaklığı ve ortam sıcaklığı arasındaki fark arttıkça sistemin ısı kayıpları da artmaktadır. Bu tez çalışmasında çalışma akışkanları için sabit sıcaklık değeri kullanıldığı ve sayısal analiz gerçekleştirilirken fotovoltaiik termal sistemin çevre ile olan ısı kayıpları adyabatik sınır şartı ile ihmal edildiği için sistem performansı değerlendirmesi yapılırken Eş. 3.4 kullanılmıştır.

4. NANOAKIŞKANLAR

Isıtma ve soğutma gibi ısıl proseslerde sistem verimini etkileyen ana faktörlerden birisi transfer edilen ısı miktarıdır. Bu sebeple ısı dağılımı için uygun ısı transfer akışkanı seçimi sistem tasarımı için kritik bir parametre haline gelmektedir. Isı transfer mekanizmalarında yaygın olarak su, motor yağı ve etilen glikol gibi çalışma akışkanları kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra oda sıcaklığında katı fazdaki metallerin, sıvılara oranla daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olduğu da tespit edilmiştir [25]. Maxwell bu tespitten yola çıkarak çalışmalarında metal parçacıkların konvansiyonel sıvılar ile karışımını sağlayıp, parçacıkların sıvıların ısıl iletkenliklerini iyileştirme yönündeki etkisini ortaya koyan ilk kişidir. Ancak yaptığı çalışmalarda ısı transferindeki artışın yanı sıra baz sıvıdaki parçacıkların akış kanallarında tıkanmaya ve aşınmaya neden olduğunu da rapor etmiştir [26].

Daha sonra Masuda vd. bu dezavantajları giderebilmek için mikro boyutlardaki katı parçacıkların baz akışkana eklenmesiyle ısıl iletkenlikteki artışı incelemiş, ancak Maxwell gibi arttırılmış pompalama gücü ve diğer problemlerle karşılaşmıştır [27]. 1995 yılında Dr. Choi çözüm olarak ortalama 10 nm boyutlarındaki katı parçacıkları süspanse etmiş ve elde edilen bu heterojen karışım için ilk kez nanoakışkan terimini kullanmıştır [28]. Şekil 4.1' de CuO nanoparçacıklarının taramalı elektron mikroskobundaki görüntüsü verilmektedir [29].



Resim 4.1. CuO parçacıklarının SEM görüntüsü

Bununla birlikte araştırmacılar, nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini, reolojik özelliklerini, çeşitli kullanım alanlarını, gerekli pompalama gücündeki artış gibi engelleri ve farklı nanoparçacıklar ve farklı baz akışkanların stabilitesini vb. konuları tartışan çalışma referanslarını oluşturmuştur.

Nanoakışkanların gösterdiği olumlu performans araştırmacıları tek tip nanoparçacık yerine baz akışkanda farklı nanoparçacık kombinasyonlarına yöneltmiştir. İki veya daha fazla katı homojen fazın eş zamanlı olarak baz akışkan ile karıştırılmasıyla oluşan yeni çalışma akışkanı "hibrit nanoakışkan" olarak adlandırılmaktadır. Bu gelişmiş yeni nanoakışkan sınıfı sinerjetik etkiler nedeni ile tekli nanoakışkanlara kıyasla farklı ısı transferi özellikleri, termofiziksel ve hidrodinamik özellikler sunmaktadır [13].

Nanoakışkanların ısı transfer performansında iyileştirme sağlamanın temel nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [30]:

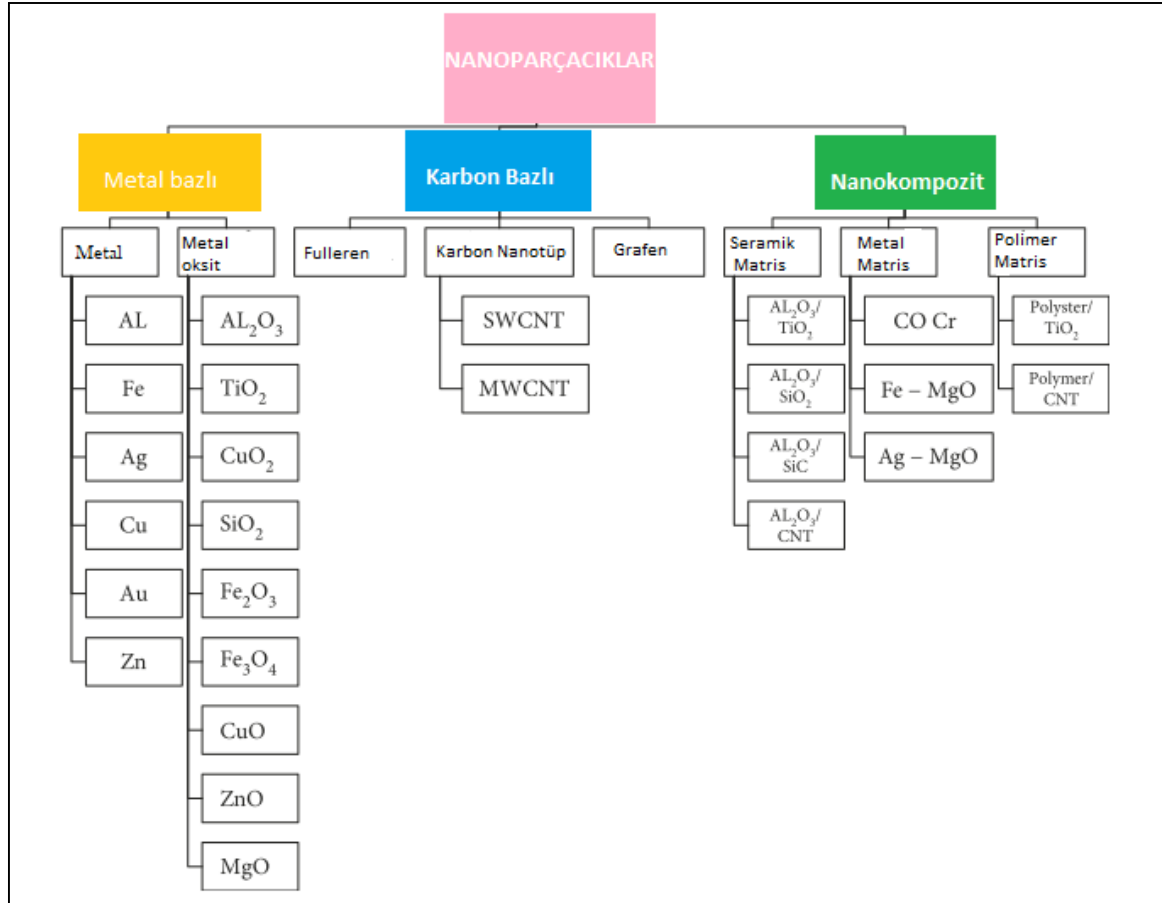
- ✓ Baz akışkan içerisine dağıtılan nanoparçacıklar, akışkanın temas yüzey alanını ve ısı kapasitesini artırmaktadır.
- ✓ Baz akışkandan daha yüksek ısı iletkenliğe sahip parçacıklar akışkanın da ısı iletkenliğini artırmaktadır.
- ✓ Akışkan ve akış geçiş yüzeyi, parçacıklar arasındaki etkileşim ile artmaktadır.
- ✓ Akışkanın dalgalanması ve türbülansı artmaktadır.
- ✓ Nanoparçacıkların dağılımı, akışkanın enine sıcaklık gradyanını düzleştiren bir etki göstermektedir.

4.1. Nanoparçacıkların Sınıflandırılması

Nanoparçacıklar baz akışkan ile karıştırıldıklarında bu akışkanın ısı iletkenliğinin ve sıvı ile temas yüzeyi arasındaki taşınım ısı transferinin iyileşmesine yardımcı olmaktadır [31]. Şekil 4.1’ de görüldüğü üzere nano boyutlu parçacıklar metal bazlı, karbon bazlı ve nanokompozitler olarak 3 ayrı kategoride sınıflandırılabilir [32]. Yapılan çalışmalarda ısı iletkenlikte gelişme amaçlandığından genel olarak ısı iletkenliği yüksek metal ya da metal oksitler seçilmektedir.

Metal bazlı nanoparçacıklar metaller ve metal oksitler olarak iki alt gruba ayrılmaktadır. Metal nanoparçacıklar 1-100 nm arasında değişen en, boy ve kalınlıkta olan metalleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Metallerden yapıcı ve yıkıcı yöntemlerle nano boyutlarda parçalar sentezlenmektedir. Nanoparçacık sentezi için genellikle kobalt (Co), bakır (Cu), kurşun (Pb), gümüş (Ag) ve çinko (Zn) metalleri kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra neredeyse tüm metallerde de bu işlemi yapmak mümkündür. Metallerin oksijenlerle

oluşturduğu bileşikler ise metal oksitleri oluşturmaktadır. Metallerdeki çeşitlilik nedeniyle çok sayıda metal oksit de sentezlenebilmektedir. Alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3), silisyum dioksit (SiO_2) ve titanyum oksit (TiO_2) metal oksit nanoparçacıklara örnek olarak verilebilmektedir [33].



Şekil 4.1. Nanoparçacıkların sınıflandırılması

Karbon bazlı nanoparçacıklar aynı tip atomlardan oluşan farklı moleküler yapılara sahip fulleren, karbon nanotüp ve grafen gibi karbonun farklı allotroplarından oluşmaktadır. Fulleren, karbon sayısı yirmiden fazla olan küresel bir yüzeyin beşgen ve altıgen köşelerinde bulunan atomlardan oluşmaktadır. En yaygın türü altmış karbon atomundan oluşan fulleren C-60' tır. Grafen ise farklı karbon allotroplarının da temel yapısını oluşturan tek katmanlı, iki boyutlu karbon formudur [32,34]. Karbon nanotüpler altıgen karbon atomu ağına sahip tek bir saf grafit tabakası içeren karbon allotropudur. Kolayca bükülebilmekte ve kırılmadan tekrar eski haline gelebilmektedir. Genel olarak tek katmanlı ve çok katmanlı olarak iki grupta incelenmektedir [35].

Nanokompozitler, kendini oluşturan bileşenlerin özelliklerinden farklı özelliklere sahip olan, bu bileşenlerden en az birinin 100 nm' den daha küçük boyuta sahip olduğu birçok fazdan oluşan malzemelerdir. Seramik, metal ve polimer matris çeşitlerinden oluşan nanokompozitler yüksek alan/hacim oranları sayesinde temas yüzeyleri kompozit malzemelerden oldukça fazladır [36]. Çizelge 4.1'de farklı malzemelere ait ısı iletim katsayıları gösterilmektedir [37].

Çizelge 4.1. Çeşitli malzemelerin ısı iletim katsayıları

	Malzeme	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
Metalik Katılar	Bakır	401
	Alüminyum	237
Metalik Olmayan Katılar	Silikon	148
	Alümina (Al_2O_3)	40
Metalik Akışkanlar	Sodyum (644 K)	72,3
Metalik Olmayan Akışkanlar	Etilen Glikol	0,253
	Su	0,613
	Makine Yağı	0,415

4.2. Nanoakışkan Özellikleri

Maxwell' in çalışmalarından bu yana konvansiyonel akışkanların içine farklı özelliklerdeki mikro ve nano boyutlarda katı parçacıkların eklenmesi ile karışımın ısı özelliklerini iyileştirme çalışmaları devam etmektedir. Nanoakışkanlar hem baz akışkanın hem de sahip olduğu nanoparçacıkların özelliklerini taşımaktadır. Oluşturulan nanoakışkanın özelliklerinin ve akış karakterinin anlaşılması, iyileşmeye neden olan etkenlerin nasıl geliştiğini anlamak için kilit rol oynamaktadır [31]. Nanoakışkanların özellikleri nanoparçacığın şekline, boyutuna ve hacimsel oranına göre değişiklik göstermektedir [38]. Isıl verimliliği en yüksek noktaya çıkarabilmek için nanoakışkanın özgül ısı kapasitesi, viskozitesi, ısıl iletkenliği gibi özelliklerinin optimum düzeyde çalışma şartlarının belirlenmesi önemlidir.

4.2.1. Viskozite

Akışkanlarda akmaya karşı gösterilen direnci temsil eden viskozite, pompalama gücü, basınç düşüşü vb. faktörleri doğrudan etkilemektedir. Viskozitenin incelendiği bazı çalışmalarda hibrit ve tekli nanoakışkanlar, kayma gerilimi ve kayma hızının birinci dereceden orantılı

olduğu Newton tipi akışkan özelliği göstermektedir. Ancak farklı baz akışkanlar ve konsantrasyonlarda nanoakışkan Newton tipi olmayan akışkan özelliği de gösterebilmekte ve farklı kuvvetler altında davranışlarını tahmin etmek zorlaşmaktadır [38]. Fedele vd. kütlece %1-%35 oranlarında ve 283 K-343 K sıcaklık aralığında TiO_2 /su nanoakışkanı için, Chen vd. kütlece % 8 oranında 293 K-333 K sıcaklık aralığında TiO_2 /etilen glikol nanoakışkanı için Newton tipi davranış tespit etmiştir [39,40]. Öte yandan literatürde farklı konsantrasyonlar ya da baz akışkanlar ile Newton tipi akış davranışı göstermeyen sonuçlarda incelenmiştir. Afrand vd. Fe_2O_4 +Ag/etilen glikol nanoakışkanının reolojik davranışlarını incelemek için yaptıkları çalışmada % 0,3 hacim konsantrasyonuna kadar Newton tipi, % 0,6 - % 1,2 hacim konsantrasyonu arasında ise Newton tipi olmayan akış özelliği tespit etmişlerdir [41].

Parçacık boyutunun viskoziteye etkisi incelendiğinde farklı nanoparçacık ve konsantrasyonlarda farklı sonuçlar elde edildiği görülmektedir [42]. Nguyen vd. alümina/su nanoakışkanı için % 4 hacim konsantrasyonunda 36 ve 47 nm nanoparçacık boyutu için aynı viskozite değerine ulaşmış iken hacim konsantrasyonunun artması ile birlikte daha büyük boyutlu parçacıklarda daha yüksek viskozite değerine ulaşmıştır [43]. Ancak Namburu vd. çalışmasında bu bulgulara ters olarak inceledikleri SiO_2 nanoparçacığı için parçacık boyutunun artması ile akışkan viskozitesinde azalma tespit edilmiştir [44].

Nanoparçacık boyutu ve Newton/Newton olmayan akış tipi özelliklerinin aksine yapılan çalışmalar ile sıcaklık ve hacim konsantrasyonunun viskoziteye etkisi üzerinde genel bir kaniya varılmıştır. Hacim konsantrasyonundaki artış çok düşük olsa bile nanoakışkan viskozitesini artırmaktadır. Öte yandan sıcaklık arttıkça nanoparçacıklar ve baz akışkan arasında moleküller arası çekimin zayıfladığı ve sıcaklık artışının viskoziteyi düşürme eğiliminde olduğu ortaya konulmuştur [42].

Nanoakışkanın reolojik parametrelerindeki bu çelişkiler araştırmacıları viskozitesinin hesaplanması için farklı eşitlikler geliştirmeye yöneltmiştir. Bu çalışmalardan ilki Einstein' ın etkin viskozite modelidir [45]. Einstein küçük küresel parçacıklar içeren süspansiyon viskozitesinin parçacıkların hacimsel konsantrasyonuna bağlı olduğu bir eşitlik geliştirmiştir.

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2,5\phi) \quad (4.1)$$

Formülde μ_{bf} baz akışkanın viskozitesini, μ_{nf} nanoakışkanın viskozitesini ve φ hacimsel konsantrasyonu temsil etmektedir. Ancak Einstein'ın etkin viskozite modeli küçük konsantrasyonlarda ($\varphi < 1$) verdiği doğru sonuçlarla sınırlıdır [46].

Einstein'ın daha kısıtlı olan modelini geliştiren Brinkman tarafından daha yüksek konsantrasyonlar için doğru sonuçlara ulaşılmıştır [47].

$$\mu_{nf} = \left(\frac{1}{(1-\varphi)^{0.25}} \right) \mu_{bf} \quad (4.2)$$

Yapılan çeşitli deneysel analizler tek tip nanoparçacık içeren nanoakışkanlar için geçerli olan bu bağıntıların hibrit nanoakışkanların viskozitesini tahmin etmede yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu tez kapsamında hibrit nanoakışkan için deneysel verilerle uyumlu olduğu ortaya konan Eş. 4.3 kullanılmıştır [48].

$$\mu_{hnf} = \mu_{bf}(1 + 32,795\varphi - 7214\varphi^2 + 714600\varphi^3 - 0,1941 \cdot 10^8\varphi^4) \quad (4.3)$$

Burada hnf alt indisi hibrit nanoakışkanı temsil etmektedir.

4.2.2. Isı iletim katsayısı

Çalışma akışkanının ısı iletkenliğindeki iyileşme, ısı transfer mekanizmasının performansını etkileyen bir diğer etkidir. Isı iletkenliğinin belirlenmesi ile ilgili ilk eşitliklerden biri Maxwell tarafından milimetre ve mikrometre boyutları arasındaki küresel parçacıklar için geliştirilmiştir [49]. Maxwell eşitliği parçacıklar arasındaki etkileşimi göz ardı ederek denklemini parçacığın şeklinden bağımsız olarak oluşturulmuştur. Denklem katı parçacığın nanoakışkan içerisindeki hacimsel oranını ve ısı iletkenliğini birer etken olarak tanımlamaktadır.

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf})\varphi}{k_p + 2k_{bf} + (k_p - k_{bf})\varphi} k_{bf} \quad (4.4)$$

Burada k_{nf} nanoakışkanın etkin ısı iletkenliğini, k_{bf} baz akışkanın ısı iletkenliğini, k_p parçacığın ısı iletkenliğini temsil etmektedir.

Daha sonra Hamilton ve Crosser tarafından sadece küresel parçacıklar için geçerli olan bu eşitlik geliştirilerek küresel olmayan parçacıklar içinde geçerli olan bir eşitlik oluşturulmuştur [50]. Bu eşitlikte çeşitli malzeme türleri için deneysel olarak belirlenebilen n şekil faktörü kullanılmıştır.

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{k_p + (n-1)k_{bf} - (n-1)\varphi(k_{bf} - k_p)}{k_p + (n-1)k_{bf} + \varphi(k_{bf} - k_p)} \quad (4.5)$$

Deneysel şekil faktörü $n = 3/\psi$ ile formülize edilmekte ve ψ , kullanılan parçacıkla aynı hacimde olan kürenin yüzey alanının parçacığın yüzey alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. $\psi = 1$ olduğunda ise bu denklem Maxwell denklemine dönüşmektedir.

Araştırmacılar tarafından nanoakışkanın ısı iletkenliğinin eklenen parçacığın ısı iletkenliği, şekli, hacim konsantrasyonu, Brown hareketi, yüzey alanı, baz akışkanın pH değeri, sıcaklık gibi birçok değişken ile değiştiği sonucuna varılmıştır. Çalışmaların çoğu

- ✓ iletkenliğin parçacık konsantrasyonu ve sıcaklıktaki artışla arttığı,
- ✓ daha yüksek sıcaklıkta, nanoparçacıkların Brown hareketinin etkisinin önemli hale geldiği,
- ✓ ısı iletkenlikte maksimum artışın pH değeri 7 civarında (nötr çözelti) olduğu,
- ✓ küme oluşumunun iletkenlik değerlerini düşürdüğü,
- ✓ silindirik şekilli parçacıkların, küresel şekilli parçacıklar ile karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır [41].

Çoğu çalışma parçacık hacim konsantrasyonunun artmasının ısı iletkenliği artırır yönde etki ettiğini gösterse de hangi hacim konsantrasyonuna kadar olumlu etkinin devam ettiği kesin değildir. Diğer yandan modellerin geneli parçacığın Brown hareket hızını ya da parçacık boyutunun etkisini denklem bileşenlerinden biri haline getirmemiştir [51].

Bu tez çalışmasında literatürden alınan CuO/su nanoakışkanı için deneysel verilerle uyumlu olduğu belirlenen Eş. 4.6 [52] ve CuO+Fe/su hibrit nanoakışkanı için ise Eş. 4.7 [48] kullanılmıştır.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \left(\frac{3\left(\frac{k_p}{k_{bf}}\right)\varphi}{\left(\frac{k_p}{k_{bf}} + 2\right) - \left(\frac{k_p}{k_{bf}} - 1\right)\varphi} \right) \quad (4.6)$$

$$k_{hnf} = k_{bf} \left(\frac{0,1747 \cdot 10^5 + \varphi_p}{0,1747 \cdot 10^5 - 0,1498 \cdot 10^6 \varphi_p + 0,1117 \cdot 10^7 \varphi_p^2 + 0,1997 \cdot 10^8 \varphi_p^3} \right) \quad (4.7)$$

4.2.3. Yoğunluk

Yoğunluk, akış karakterini belirleyen Reynolds sayısı, sürtünme faktörü, basınç kaybı ve Nusselt sayısı gibi önemli parametreleri etkilediği için akışının önemli bir özelliği olarak kabul edilmektedir [53]. Araştırmacılar tarafından nanoakışkanların yoğunluğu ile ilgili farklı sonuçlar bildirilmektedir, bunların çoğu belirli bir sıcaklık veya belirli bir nanoakışkan için geçerlidir. Teorik olarak farklı nanoakışkanların yoğunluğunu elde etmek için kullanılan birçok yöntem ve eşitlik vardır. Nanoparçacık yoğunluğunun sıvıların yoğunluğundan daha yüksek olmasından dolayı, nanoakışkan içerisindeki parçacık miktarındaki artışın, nanoakışkan yoğunluğunun da artması ile sonuçlanmasını beklemektedir. Nanoparçacıkların şekli, boyutu, zeta potansiyeli ve diğer parametreleri akışkanın yoğunluğunu etkilemezken baz akışkan türü ve nanoparçacık hacim konsantrasyonu yoğunlukta önemli bir rol oynamaktadır [54]. Araştırmacılar tarafından teorik analizlerde yaygın olarak Pak ve Cho tarafından geliştirilen Eş. 4.8 kullanılmaktadır [55].

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_{bf} \quad (4.8)$$

Burada ρ yoğunluğunu temsil etmektedir. Tek parçacıklı nanoakışkanlar için geçerli olan bu eşitlik hibrit nanoakışkanlar için Eş. 4.9 gibi genişletilebilmektedir [56].

$$\rho_{hnf} = \varphi_1 \rho_{p1} + \varphi_2 \rho_{p2} + (1 - (\varphi_1 + \varphi_2)) \rho_{bf} \quad (4.9)$$

4.2.4. Özgül ısı kapasitesi

Isı transfer mekanizmalarında elde edilebilecek ısı miktarını belirleyen faktörlerden biri de özgül ısı kapasitesidir. Isı yayılım katsayısı, akışkanın sıcaklığı, Prandtl sayısı gibi değerlerin doğru tespit edilebilmesi için bu değerlerin doğru tespit edilmesi önemlidir. Araştırmalar yaygın olarak kullanılan çoğu nanoakışkanın özgül ısısının hacim konsantrasyonundaki artış ile beraber azaldığını ancak bu etkinin tam tersi sonuçlar veren çalışmalarında literatürde mevcut olduğunu göstermektedir. Aynı nanoakışkan için, yüksek nanoparçacık çapına sahip nanoakışkanlarda özgül ısı daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca yüzey aktif maddeler nanoakışkanın özgül ısı değeri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Genellikle,

nanoakışkanın özgül ısısı, karışımlara yüzey aktif madde eklendikten sonra baz akışkana kıyasla artmaktadır [57].

Özgül ısı kapasitesi belirlenirken kullanılan iki yaygın eşitlik vardır. Eşitliklerden biri sıvı ve parçacık karışımına dayanan [55]:

$$C_{nf} = \varphi C_p + (1 - \varphi) C_{bf} \quad (4.10)$$

eşitliğidir. Burada C özgül ısı kapasitesini temsil etmektedir.

Diğer eşitlik ise Eş. 4.10'nun nanoparçacık ve baz akışkanın ısı dengede olduğunu varsayarak geliştirilmiş halidir [58].

$$(\rho C)_{nf} = \varphi (\rho C)_p + (1 - \varphi) (\rho C)_{bf} \quad (4.11)$$

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_{bf} + \varphi (\rho_p) \quad (4.12)$$

Bu tez çalışması için tekli nanoakışkanın özgül ısı kapasitesi değeri Eş. 4.11 ile hesaplanırken, hibrit nanoakışkanın özgül ısı kapasitesi değeri için Eş. 4.13 [41] kullanılmıştır.

$$C_{hnf} = \frac{\varphi_{p1} \rho_{p1} C_{p1} + \varphi_{p2} \rho_{p2} C_{p2} + (1 - \varphi_{p1} - \varphi_{p2}) C_{bf}}{\rho_{hnf}} \quad (4.13)$$

4.3. Nanoakışkan Hazırlama Yöntemleri

Kurulum ve işletim maliyetlerini arttırmamasından dolayı birçok enerji prosesinde ısı transferinin kontrolü oldukça önemlidir. Son yıllarda ısı transfer sistemlerinde çalışma akışkanı olarak nanoakışkan teknolojisinin kullanılması araştırmacılar tarafından deneysel ve teorik olarak analiz edilmeye başlanılmıştır [59].

Literatürde nanoakışkanlara dair iki farklı kabul bulunmaktadır. Bunlar tek faz ve çift fazlı yaklaşımdır. Tek fazlı yaklaşımda nanoakışkan konvansiyonel bir saf akışkan gibi tek faz olarak düşünülmektedir. Böylece hesaplamalar yapılırken belirli kütle, momentum ve enerji eşitlikleri kullanılabilir. Araştırmacılar bu varsayımda nanoparçacıkların ısı dengede

olduğunu kabul etmekte ve katı parçacıklar ve baz akışkan sıvı molekülleri arasında meydana gelen kayma hızını ihmal etmektedir. Bu nedenle nanoakışkanın tek etkisi deneysel olarak elde edilmiş veya teorik eşitlikler ile türetilmiş Bölüm 4.2.'deki özellikleri olmaktadır. Çift fazlı yaklaşımda ise, tek fazın aksine yerçekimi, sıvı ve katı parçacıklar arasındaki sürtünme, Brown kuvvetleri, Brown difüzyonu gibi çeşitli etkenlerden dolayı baz akışkan ve katı parçacıklar arasındaki kayma hızı hesaba katılmaktadır. Bu nedenle karışımda nanoparçacık konsantrasyonu değişken özellik gösterebilmektedir [59].

Doğru bir değerlendirme yapabilmek için, nanoparçacıkların baz akışkan içindeki stabilizesini ve aynı zamanda homojen şekilde dağılımını sağlamak başarılı bir hazırlık aşaması gerektirmektedir [60]. Nanoakışkanlar tek aşamalı ya da iki aşamalı yöntem ile hazırlanabilmektedir.

4.3.1. Tek aşamalı yöntem

Tek aşamalı yöntem nanoparçacığın hazırlanması ve baz akışkan içinde dağılması adımlarını birlikte gerçekleştiren yöntemdir. Buhar biriktirme, lazer ablasyon tekniği, kimyasal reaksiyonlar vb. metotlarla nanoakışkan üretilmektedir [61]. Nanoparçacıkların erozyonunu ve oksidasyonu önlemek için daha çok metal parçacıklar içeren nanoakışkanların hazırlanması için kullanılmaktadır. İki aşamalı yöntemle göre nanoparçacıklarda yığılma daha az görülmektedir. Böylece süspansiyonun stabilitesini ve homojen dağılımını sağlamak daha kolay olmaktadır. Ancak maliyetin yüksek ve üretimin yavaş olması nedeniyle üretim miktarı iki aşamalı yöntemle göre daha sınırlıdır [62].

4.3.2. İki aşamalı yöntem

Bu yöntemde nanoakışkan hazırlama işlemi iki adımda gerçekleşmektedir. İlk adımda nanoparçacıklar, nanotüpler fiziksel ve kimyasal yöntemler ile toz haline getirilmektedir. Devamında nano boyutlardaki toz, manyetik güç çalkalayıcı, ultrasonik çalkalayıcı, yüksek parçalayıcı karıştırıcı vb. cihazlar aracılığıyla bir baz akışkan içine dağıtılmaktadır [63].

İki aşamalı yöntem metotları endüstriyel seviyede hazır olduğu için daha yaygın ve ekonomiktir. Diğer bir taraftan, nanoparçacıklar arasındaki güçlü Vander Waals kuvvetleri yüzünden parçacıkların tamamen dağılmadan yığılma ihtimali vardır. Daha iyi bir ısıtıl

iletkenlik için engel oluşturan bu durumun olma ihtimali hacim konsantrasyonundaki artış ile de artmaktadır. Literatür incelendiğinde iki aşamalı yöntemin oksit nanoparçacık ve karbon nanotüp ile hazırlanan nanoakışkanlar için uygun olduğu anlaşılmaktadır [62].

4.4. Kullanım Alanları

Isı transfer sistemleri gıda endüstrisi, atık ısı geri dönüşüm sistemleri, güç üretimi, sistem soğutulması gibi birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır. Aynı girdi miktarı ile elde edilen ısı transfer oranının artması hem ısı transfer zamanını hem de sistem verimini artırır etki göstermektedir. Çalışma akışkanı olarak nanoakışkanların kullanımı baz akışkana göre daha yüksek ısı transfer özelliklerine sahip nanoparçacıklar sayesinde baz akışkanı da daha verimli hale getirmektedir.

Elektronik cihazların yüksek sıcaklıklarda çalışması ve yüzey boyutlarının küçük olması elektronik cihaz soğutma sistemlerinde nanoakışkan kullanımına yönelik ilgiyi artırmaktadır. Nanoakışkanlar soğutma sistemindeki mikro kanalların duvarı ile soğutucu arasındaki sıcaklık farkını ve ısıl direnci azaltması sayesinde aynı sistemde daha fazla ısı çekerek sistem verimini arttırmaktadır. Otomobil ve kamyon motorlarında kullanılan soğutucu ve motor yağlarına nanoakışkan eklenmesi yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Bu iyileşme soğutma sisteminin boyutlarını azaltırken, motordan yayılan ısı miktarını da azaltmaktadır. Yüksek kaynama noktasına sahip olan nanoakışkanlar daha yüksek çalışma sıcaklıklarına imkan vermektedir. Bina ısıtma sistemlerinde kullanılan ısı değiştiricilerde nanoakışkanlar, gerekli soğutucu akışkanın hacimsel ve kütleli debisini azaltarak pompa gücünü ve boyutunun azaltılmasına yardımcı olmaktadır. İlk yatırım maliyetinin düşürmesiyle birlikte çalışma maliyetlerini de azaltmaktadır. Bu sayede daha ucuz olan sistem aynı zamanda daha da az çevre kirliliğine neden olmaktadır. Uzay ve savunma sanayisinde kullanılan ekipmanların güç yoğunluğunun çok yüksek ancak ekipman boyutunun ve ağırlığının olabildiğince küçük ebatlarda olması gerektiğinden nanoakışkan uygulamaları için uygun bir alandır [63].

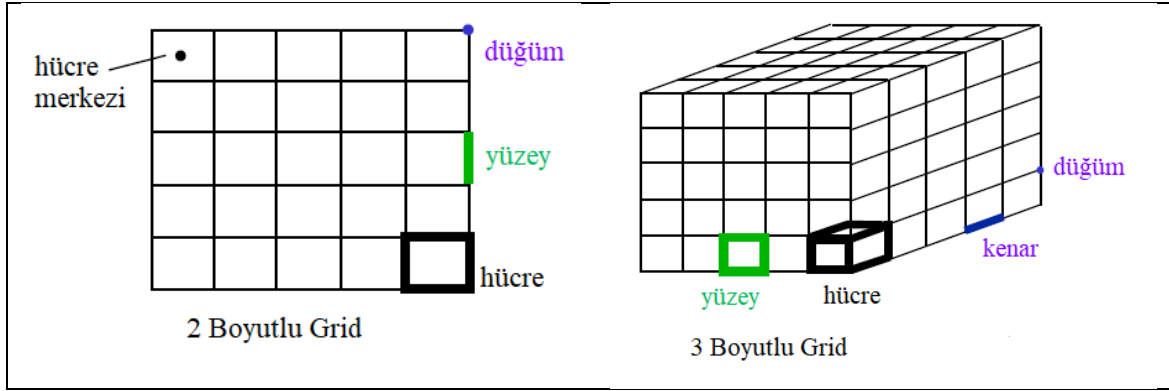
5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Isı transferi ve akış mekaniğinin de içinde yer aldığı mühendislik problemleri çözümünde bilinen üç yöntem vardır; deneysel, sayısal ve teorik yöntem. Fiziksel bir proses ile ilgili en doğru bilgiye çoğunlukla deneysel ölçümler ile ulaşılmaktadır. Yeni matematiksel formülasyonların geliştirilebilmesi için de gerekli veriler çoğunlukla deneysel olarak elde edilmektedir. Fiziksel bir proses hakkında en güvenilir bilgi genellikle gerçek ölçümle verilmektedir. Ancak çalışılacak alana da bağlı olarak deneysel yöntem diğer yöntemlere göre daha pahalıdır. Genellikle uzun zaman gerektiren deneysel çalışmalarda aynı zamanda yaşanabilecek teknik aksaklıklarda göz ardı edilmemelidir. Teorik bir çözümlemenin ise basit geometrilerdeki basit çözümler için uygun olması ve çözümlemede bazı kısıtlamalar gerektirmesi deneysel yöntemle göre ucuz olmasına rağmen kullanım alanını kısıtlamaktadır.

Pratikte karşılaşılan akış, ısı ve kütle transferi problemleri oldukça karmaşık olduğu için günümüzde bu ve benzer problem analizleri için sayısal yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiziksel bir model yerine matematiksel model kullanılarak yapılan sayısal analizler, çeşitli eşitlikler kullanılarak ayrıştırılan her bir çözüm bölgesi için problemin çözümlenmesi ile gerçekleşmektedir. Böylece büyük problem doğrudan çözümlenmek yerine daha küçük ve daha kolay çözülebilir problemlere dönüştürülmektedir. Sayısal analizler ile problemlerin sonucunu deney aşamasına gelmeden önizlemek ve mevcut deney sonuçlarını iyileştirebilmek mümkündür. Böylelikle hem zamandan hem de deney için gerekli olan çeşitli malzeme kalemlerinden tasarruf sağlanabilmektedir [64].

5.1. HAD Terminolojisi

Fluent yazılımı ile gerçekleştirilen sayısal analizin en önemli basamaklarından biri ağ yapısıdır. Ağ yapısını ve sayısal analizin işleyişini anlayabilmek için öncelikle Bölüm 5'te bahsedilecek olan kavramların neleri temsil ettiğini anlamak gerekmektedir. Ağ ile ilgili kullanılan bazı kavramların iki boyutlu ve üç boyutlu ağ yapılarındaki karşılıkları Şekil 5.1 yardımıyla gösterilmektedir.



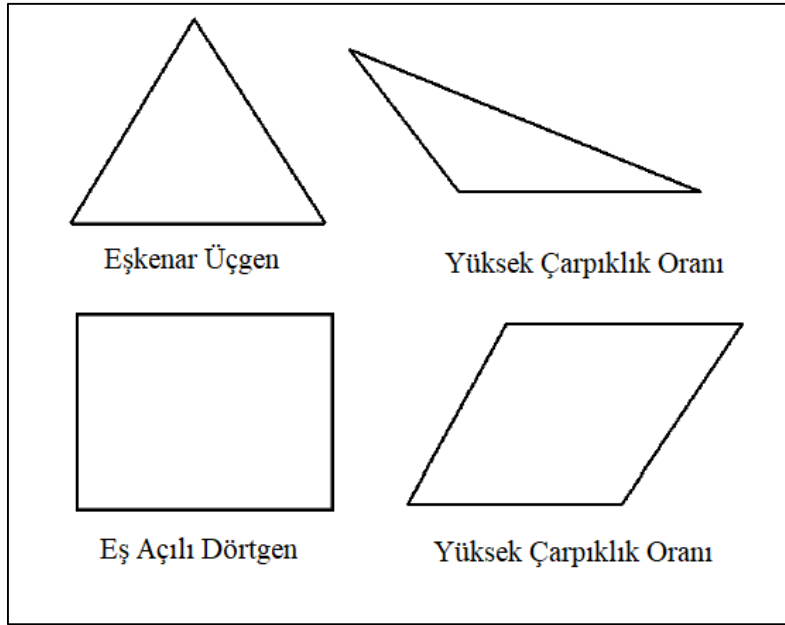
Şekil 5.1. Ağ yapısı elemanları

Çizelge 5.1. Ağ yapısı elemanlarının karşılıkları

Kavram	Anlam
Hücre	Hesaplanabilir alanın bölündüğü kontrol hacimleri
Düğüm	Grid noktaları
Kenar	Bir yüzeyin sınırı
Yüzey	Bir hücrenin sınırı
Bölge	Düğümlerin, yüzeylerin ve hücrelerin gruplanması
Etki alanı	Düğüm, yüzey ve hücre bölgelerinin gruplanması

Çarpıklık

Çarpıklık, oluşturulan ağ yapısının kalitesini belirleyen başlıca ölçütlerden biridir. Çarpıklık değeri bir yüzeyin veya hücrenin ideal koşullarda olması gereken boyutlara ne kadar yaklaştığını göstermektedir. Çarpıklık değerinin sıfır olması eşkenar bir hücreyi temsil ederken bu değer bir olması hücre kalitesinin kabul edilebilir bir değerde olmadığını göstermektedir. Şekil 5.2 olması gereken ve çarpık olan eş açılı dörtgen ve üçgen şeklindeki ağları göstermektedir [65].



Şekil 5.2. İdeal ve çarpık eşkenar ve dörtgen

Çarpıklık değeri Eş. 5.1 ile hesaplanmaktadır:

$$\text{Çarpıklık} = \frac{\text{İdeal hücre boyutu} - \text{Hücre boyutu}}{\text{İdeal hücre boyutu}} \quad (5.1)$$

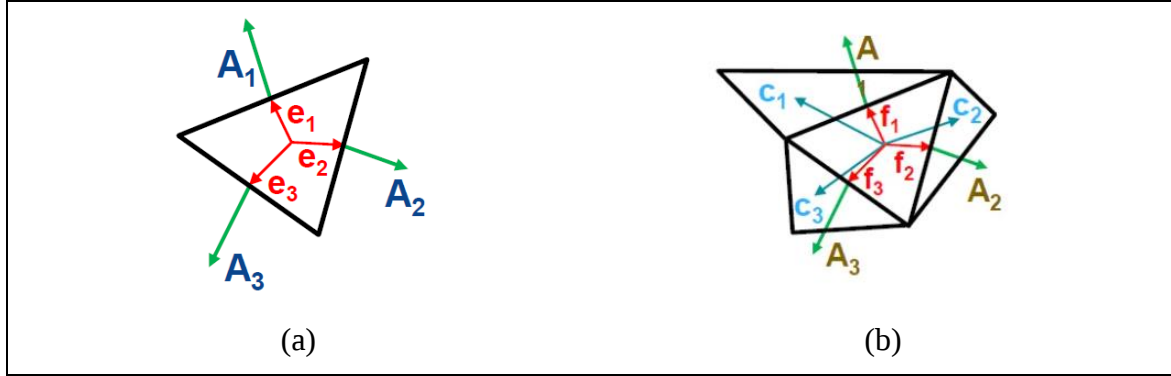
Burada ideal hücre boyutu aynı çevreye sahip bir eşkenar hücrenin boyutunu temsil etmektedir. Kaliteli bir ağ için hücrelerin çarpıklık değeri iki boyutlu tasarım için yaklaşık 0,1 ve üç boyutlu tasarım için 0,4'tür. Çizelge 5.2 hücre çarpıklığı ve kalitesi arasındaki ilişkiyi anlamak için bir kılavuz oluşturmaktadır. İki boyutlu tüm hücreler iyi veya çok iyi olmalıdır. Üç boyutta ise çoğu hücrenin iyi veya çok iyi olması yeterlidir. Küçük bir yüzdenin kabul edilebilir aralıkta ve birkaç hücrenin ise zayıf olması ağın kalitesini çok fazla etkilememektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada çarpıklık oranı değerlendirilirken ortalama değerler kullanılmıştır [65].

Çizelge 5.2. Çarpıklık oranı değer aralıkları

Mükemmel	Çok iyi	İyi	Kabul edilebilir	Vasat	Kabul edilemez
0-0,25	0,25-0,5	0,5-0,8	0,8-0,94	0,95-0,97	1

Diklik

Ağ dikliği kavramı, bitişik eleman yüzeyleri (veya bitişik eleman kenarları) arasındaki açıların bazı optimal açılara ne kadar yakın olduğu ile ilgilidir. Diklik değeri Eş. 5.2 ve Eş. 5.3 ile hesaplanmaktadır [65].



Şekil 5.3 (a) Yüzey (b) hücrede diklik değeri için kullanılan vektörler

Bir hücre için diklik değeri:

$$\min \left(\frac{A_i f_i}{|A_i| |f_i|}, \frac{A_i c_i}{|A_i| |c_i|} \right) \quad (5.2)$$

ile hesaplanmaktadır. Bir yüzey için ise diklik değeri:

$$\frac{A_i e_i}{|A_i| |e_i|} \quad (5.3)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada A_i , yüzeyin normal vektörü f_i , hücrenin ağırlık merkezinden bu yüzeyin ağırlık merkezine olan vektör c_i , hücrenin ağırlık merkezinden bitişik hücrenin ağırlık merkezine olan vektör ve e_i ise yüzeyin ağırlık merkezinden kenarın ağırlık merkezine olan vektörü temsil etmektedir. Diklik değeri, 0 ile 1 değeri arasında değişmektedir.

Çizelge 5.3. Diklik oranı değer aralıkları

Mükemmel	Çok iyi	İyi	Kabul edilebilir	Vasat	Kabul edilemez
0,95-1	0,7-0,95	0,2-0,69	0,15-0,2	0,001-0,14	0-0,001

5.2. Temel Eşitlikler

Bu tez kapsamında sabit ısı akısı altında üç boyutlu akış alanı incelenmektedir. Bir akış analizinde temelde dört akış alanı değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bunlar basınç ve hız alanının bileşenleridir. Dört bilinmeyene karşı, biri skaler eşitlik olan kütle korunumundan, kalan üçü ise vektörel bir eşitlik olan doğrusal momentumun korunumundan toplamda dört eşitlik çözümü gerekmektedir. Bu eşitliklere ek olarak yapılan analizde ısı transferi de gerçekleşiyor ise beşinci bir eşitlik olarak enerjinin korunumunun da hesaba katılması gerekmektedir.

Bu bilgilerden yola çıkarak tez kapsamında incelenen problemin çözümü için program alt yapısında kullanılan eşitlikler alt başlıklarda sıralanmaktadır.

5.2.1. Kütle korunumu

Newton tipi bir akışkanın daimi, sıkıştırılamaz, laminar akış koşullarında kütle korunumunu ifade eden süreklilik eşitliği Eş. 5.4' de verilmektedir.

$$\vec{V} \cdot \vec{V} = 0 \quad (5.4)$$

Burada $\vec{V}$ akışkanın hızını temsil etmektedir. Eş. 5.4'te zamana bağlı herhangi bir türevin olmaması eşitliğin zaman içerisinde istenilen bir ana uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Eş. 5.4'ün kartezyen koordinatlarda açılmış hali Eş. 5.5 ile ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.5)$$

5.2.2. Momentumun korunumu

Doğrusal momentumun korunumunu ifade eden diferansiyel eşitlik yaygın olarak kullanılan adıyla Navier-Stokes eşitliğidir. Eşitliğin Kartezyen koordinatlarda (x,y,z) ve (u,v,w) cinsinden açılan en genel hali Eş. 5.6, Eş. 5.7 ve Eş. 5.8' de verilmektedir.

Navier-Stokes eşitliğinin x bileşeni:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5.6)$$

Navier-Stokes eşitliğinin y bileşeni:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5.7)$$

Navier-Stokes eşitliğinin z bileşeni:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5.8)$$

5.2.3. Enerjinin Korunumu

Yapılan çalışmada kullanılan farklı akışkanların iletim ve taşınım ile gerçekleştirdikleri ısı transferi miktarlarının kıyaslanabilmesi için programda enerji eşitliklerinin aktif edilmesini gerekmektedir. Kullanılan enerjinin korunumu eşitliği bir işlem sırasında sisteme giren ve çıkan enerjideki değişimin, sistemde zaman içerisinde oluşan net enerji değişimine eşit olduğunu ifade etmektedir.

$$\dot{E}_{\text{giren}} - \dot{E}_{\text{çıkan}} = \frac{dE_{KH}}{dt} \quad (5.9)$$

5.3. HAD Analizinde Uygulanan Adımlar

Sayısal bir analiz gerçekleştirebilmek için Fluent yazılımında takip edilmesi gereken bazı adımlar bulunmaktadır. Akış probleminin türüne göre çeşitlenebilen temel eşitlikler aşağıda belirtilen adımlar sonucunda çözümlenmektedir [66]:

1. Seçilen bir hesaplama bölgesinde, ağ (ızgara da denir) oluşturulduktan sonra söz konusu bölge hücre adı verilen çok sayıda küçük elemanlara ayrılır. İki boyutlu yapılan bir çalışmada bölgeler için hücreler alanları ifade ederken, üç boyutlu bir çalışmada bölgeler hacimleri ifade eder. Hücrelerin her biri, korunum eşitliklerinin ayrık hallerinin çözüldüğü çok küçük kontrol hacimleri olarak düşünülebilir. Bir Hesaplamaları

Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözümünde nitelik ağın ne kadar iyi olduğuyla ilişkilidir. Bu sebeple sonraki adımlara geçmeden önce ağ niteliğinin yüksek ya da en azından yeterli olduğundan emin olmak önemlidir.

2. Sınır şartları iki boyutlu akışlar için her bir kenarda, üç boyutlu akışlar için sayısal bölgenin her bir yüzünde belirlenir.
3. Hesaplama kullanılan akışkanın türü(hava, etilen glikol, su vb.) ve yoğunluk, özgül ısı kapasitesi gibi özellikleri belirlenir. Bu adımda yazılım kütüphanesinde yüklenmiş özellik veri tabanları kullanılabilirken aynı zamanda yeni bir akışkan için de yeni özellikler tanımlanabilir.
4. Her bir HAD yazılımı için farklı olan sayısal parametreler ve çözüm algoritmaları seçilir.
5. Oluşturulan akış alanları için atanan başlangıç değerleri her bir hücre için belirlenir. Buradaki değerler iterasyon işlemlerinin gerçekleşebilmesi için başlangıç şartlarıdır. Başlangıç şartlarının doğru olması akış hesaplamalarının doğru şekilde tamamlanması için önemlidir.
6. Hesaplama için kullanılan çeşitli eşitlikler başlangıç tahminleri ile başlayarak her bir hücre için iterasyonlar ile döngüsel şekilde çözümlemeleri devam ettirir. Çözümün tamamlanabilmesi için tüm terimlerin bir tarafta toplanarak sıfıra eşit olması yani her bir hücre için artık (residual) değerinin sıfır olması gerekir. Ancak HAD çözümlerinde bu değer sıfır olması beklenen bir durum olmadığı için artık devam eden iterasyonlar ile azaltılır. Artık değer, bir hesaplamada çözümün tamdan ne kadar uzaklaştığının göstergesidir. Bu nedenle çözümleme yapılırken her bir denklem için artık değer grafik ile gösterilmektedir.
7. Çözümlemede belirlenen artık değerine yakınsama sağlandığında basınç ve sıcaklık gibi akış alanı değişkenleri grafik çizimleri ile değerlendirilebilir. Bunun yanı sıra kullanıcı değerlendirmek istediği farklı fonksiyonları da cebirsel olarak tanımlayarak analiz edebilmektedir.
8. Hesaplama her ne kadar yakınsama sağlandığında tamamlanıp değerlendirme yapılsa da her bir iterasyon için anlık sonuçları görmekte mümkündür. Böylece kullanıcı yakınsama gerçekleşmeden sabitlenen değerleri de görebilmektedir.

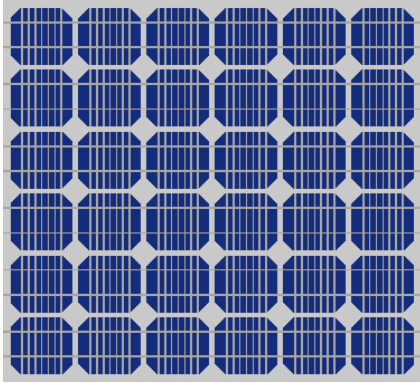
Bu adımlarla ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 5.3'ün alt başlıklarında sunulmuştur.

5.3.1. HAD geometrisinin oluşturulması

Bir sayısal analizin gerçekleştirilebilmesi için gereken ilk adım analizin gerçekleşeceği problem geometrisinin oluşturulmasıdır. ANSYS Fluent yazılımında geometri oluşturmak için iki farklı tasarım modülü vardır. Bunlardan biri Design Modeler diğeri ise Space Claim'dir. İki boyutlu tasarımlar ve basit geometrileri oluşturmakta oldukça faydalı olan modüller, çok elemanlı, üç boyutlu geometriler için karmaşık hale gelebilmektedir. Fluent yazılımı böyle durumlarda üçüncü bir seçenek olarak farklı çizim programlarından, uygun dosya uzantıları ile kaydedilebilen geometrileri kullanma imkanı sunmaktadır.

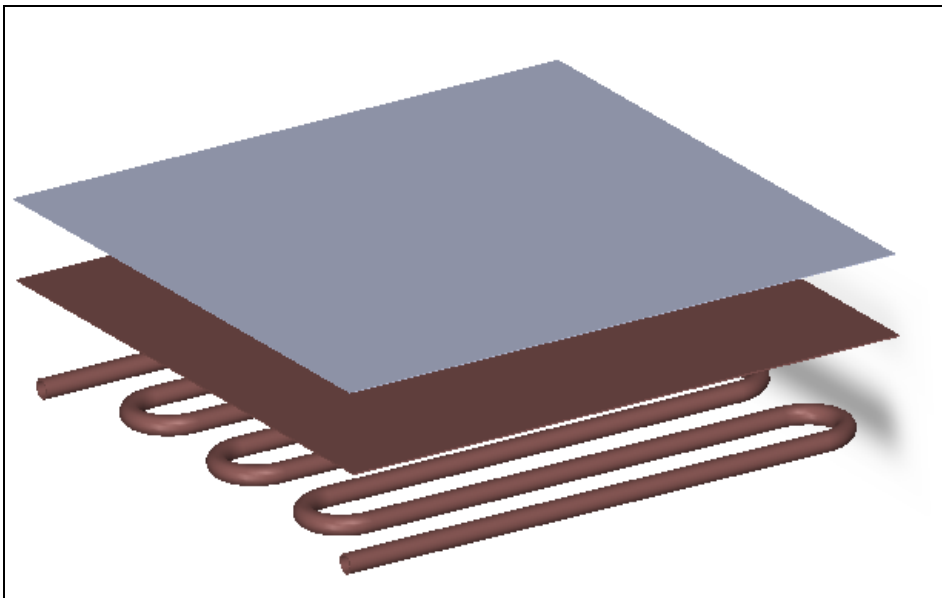
Yapılan tez kapsamında sayısal analizi gerçekleştirilecek olan fotovoltaiik termal sistem Bölüm 3'de bahsedildiği gibi farklı geometrilere sahip katmanlardan oluşmaktadır. Bir CAD yazılımı olan SolidWorks programının farklı parçaları ayrı ayrı çizme ve montaj kısmı ile birleştirebilme özelliği sunması, fotovoltaiik termal sistem tasarımının oluşturulmasına Fluent programına kıyasla daha kolay bir çözüm sağlamaktadır.

Sayısal analiz gerçekleştirebilmek için oluşturulacak modelde CAD yazılımının kullanılmasına karar verildikten sonra ikinci aşama ise modelde sadeleştirme yapıp, yapılamayacağını belirlemektedir. Oluşturulan geometrilerde ağ yapısının incelmesinin çözüm kalitesini doğrudan etkilediği bilinmektedir. Daha karmaşık geometrilerde ağ yapısı iyileştirmeleri daha fazla düğüm noktası ve hücreye sebep olacağından aynı çözüm kalitesine ulaşabilmek için bazı durumlarda eleman sayısı birkaç milyonun üstüne ulaşmakta ve analiz süresini birkaç gün hatta haftaya kadar uzatabilmektedir. Bu nedenle yapılacak analizde önemli değişikliklere neden olmadan sadeleştirme yapabilmek için modelin oransal olarak küçültülmesi veya karmaşık yapılarının azaltılması kullanılan yöntemlerdendir.



Şekil 5.4. Solar hücrenin yapısı

Yapılacak olan ısı transfer analizi incelendiğinde modelde aktarılan ısı miktarını etkileyen başlıca unsurların kullanılan malzemenin özellikleri (sıcaklık, yoğunluk vb.) ısı direnci etkileyen ısı transfer yönündeki kalınlığı ve toplam alanı olduğu görülmektedir. Şekil 5.4'e bakıldığında solar hücrenin 1 milimetreden daha küçük boyutlardan oluşan çeşitli bileşenler içerdiği görülmektedir. Solar hücrenin sahip olduğu bu geometrinin düz bir plaka gibi sadeleştirilmesi ısı transferini önemli miktarda etkileyen bir sonuç oluşturmamaktadır. Bunun yanı sıra programda yalıtım katmanının sağladığı sınır koşullarının adyabatik sınır şartıyla sağlanabilmesi ve EVA katmanının 1 milimetrenin altında kalınlığa sahip olması (ısı direncinin oldukça düşük olması) nedeniyle araştırmacılar tarafından bu katmanların etkisinin göz ardı edilmesi yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [5,67]. Böylelikle ısı analizi gerçekleştirilecek olan model Şekil 5.5 haline getirilebilmektedir.

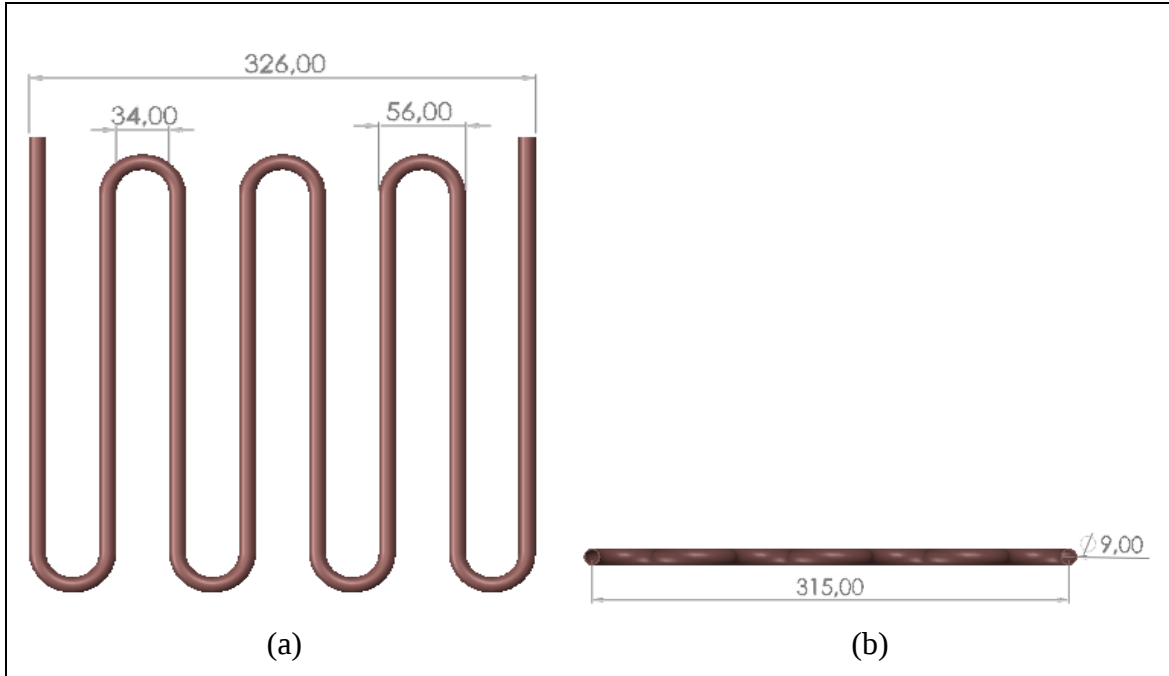


Şekil 5.5. Fotovoltaik termal sistemin sadeleştirilmiş hali

Şekil 5.5'te en üst katman karmaşık modelle aynı boyutlardaki solar hücreyi temsil ederken, diğer iki katman sırasıyla yine aynı boyutlardaki soğurucu plaka ve akış kanalını göstermektedir. Analiz gerçekleştirilirken literatürde yaygın olarak kullanıldığı şekilde solar hücrenin silikon, soğurucu plaka ve akış kanalının ise bakır malzemeden yapıldığı kabul edilmiştir. Malzemelerin termofiziksel özelliklerine Çizelge 5.4'te [68-70] ve akış kanalının ayrıntılı ölçülerine Şekil 5.6'da yer verilmiştir.

Çizelge 5.4. Kullanılan malzemelerin özellikleri

Katman adı	Malzeme türü	Boyutlar (milimetre)	Yoğunluk (kg/m^3)	Özgül ısı (J/kgK)	İletim katsayısı (W/mK)
Solar hücre	Silikon	330*350	2329	700	148
Soğurucu plaka	Bakır	330*350	8978	381	387,6
Akış kanalı	Bakır	$d_{\text{iç}}/d_{\text{dış}}=9/11$	8978	381	387,6

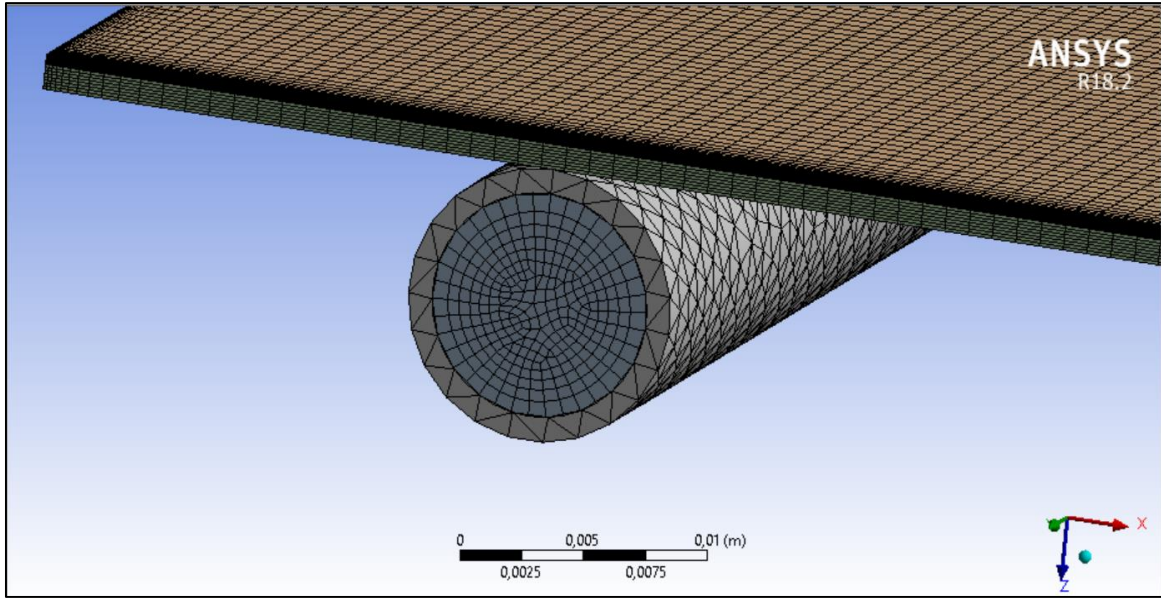


Şekil 5.6. Akış kanalının (a) üstten (b) karşıdan görünümü

5.3.2. Ağ yapısının oluşturulması

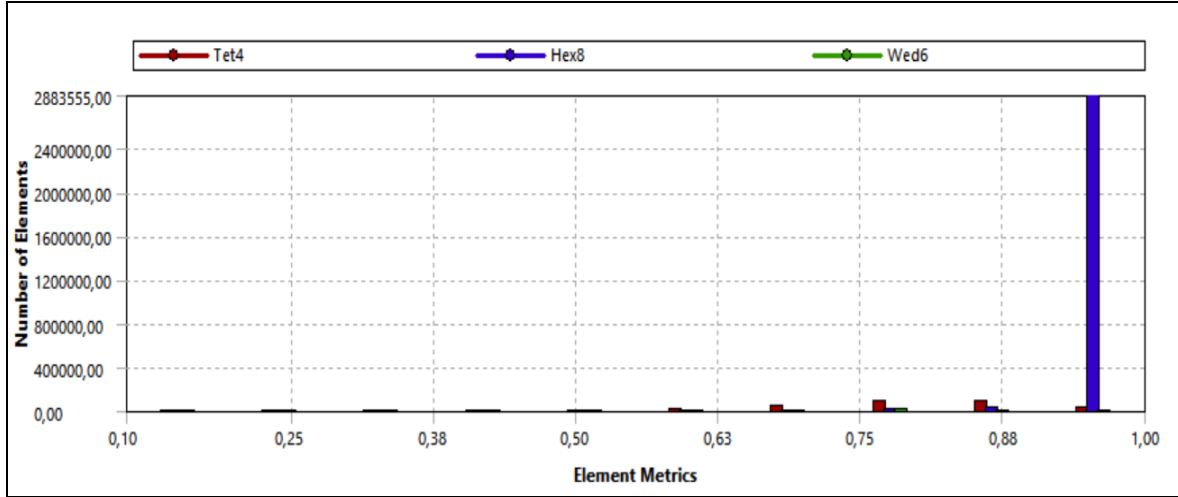
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonlu farklar, sonlu elemanlar veya sonlu hacimler yöntemi gibi sayısal yöntemler kullanarak seçilen temel eşitlikleri çözme yöntemidir. Akış probleminin özelliklerine göre değişen temel eşitlikler (diferansiyel formda veya integral formda) ayrıklaştırılmakta ve bir noktada, bir elemanda veya bir kontrol hacminde yeniden yazılmaktadır. Eşitlikler ayrık biçimde yazıldığı ve çözüldüğü için, bu eşitliklerin çözüleceği alan veya geometrinin de ayrıklaştırılması gerekmektedir. Bu ayrıklaştırma Bölüm 5.1’de sunulan üçgen, dörtgen gibi farklı geometrilere sahip ağ yapıları aracılığıyla geometrinin daha küçük alt parçalara ayrılması ile gerçekleştirilmektedir. Ancak analiz yapılacak olan model her zaman tek tip elemandan oluşmayabilir. Bazen bir CAD modelinin köşelerini veya girinti ve çıkıntılarını daha iyi şekilde tanımlayabilmek için modeli farklı ağ teknikleri ile ayrıştırmamız da gerekebilmektedir.

Fotovoltaik termal sistemin sahip olduğu katmanlara bakıldığında iki ayrı geometri içerdiği görülmektedir. Bunlar solar hücre ve soğurucu plakaya ait dikdörtgen geometri ve akış kanalına ve dolayısıyla içinden geçen akış hacmine ait silindirik geometridir. Dikdörtgen geometri çıkıntılara sahip olmayan düzlemsel bir şekil olduğundan ağ yapısının oluşturulması silindirik geometriye oranla daha kolaydır. İki katman için belirlenen ölçülerde modeli küçük parçalara ayıran eleman boyutu (element size) ayrıklaştırma şekli kullanılmıştır. Bu şekil sayesinde her katman 1 mm boyutunda bölümlere ayrılmıştır. Gerçekleştirilen bu işlem katmanların ısı akısına dik yönde ayrıklaşmasını sağlamaktadır. Ancak ağ yapısı oluşturulurken ısı transfer analizlerinde önemli olan (sonuçları ağdan bağımsız hale getiren) ısı transferinin gerçekleştiği yönde ağ yapısını yoğunlaştırmaktır. Bu nedenle dikdörtgen geometriye ait ikinci ağ oluşturma işlemi olarak ısı akısı yönünde alanı belirlenen miktar kadar parçaya ayıran ayrıklaştırma sayısı (numbers of divisions) seçeneği kullanılmış ve kenarların daha ince bölümlere ayrılması sağlanmıştır. Şekil 5.7 ayrıklaştırma işleminin sonucunu göstermektedir.

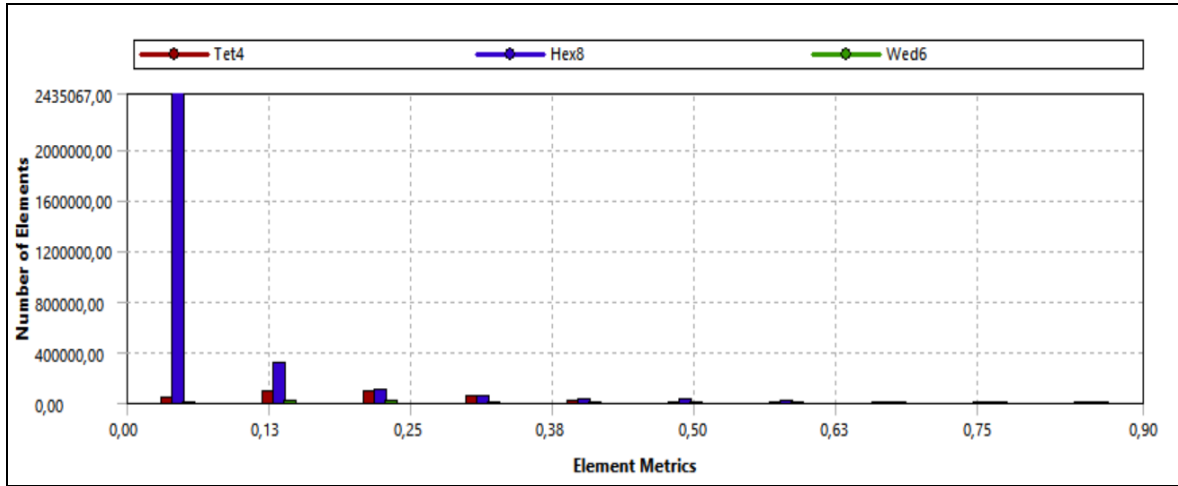


Şekil 5.7. Oluşturulan ağ yapısı

Akış kanalının ve akış hacminin ayrıklaştırılmasında modelin sahip olduğu silindirik geometri nedeni ile dairesel kenarlar sadece boyutlandırma (sizing) işlemi ile yeterli ağ kalitesine ulaşamamıştır. Bu nedenle boru ve akış hacmi için bir ağ yöntemi olan Tetrahedron (üçgen piramit) seçilmiştir. Bu yöntem ayrıklaştırma işleminde parçaları dört yüzlü üçgen şeklinde ayırmaktadır. Tetrahedron metodu Patch Conforming/Independent (Parça Uyumlu/Uyumsuz) olarak iki seçenek sunmaktadır. Uyumlu algoritmada ayrıklaştırma işlemi aşağıdan yukarıya yani köşeden başlayarak hacme doğru gelişmekte ve sınır şartı tanımlanmamış yüzeyleri de önemli kabul etmektedir. Uyumsuz algoritma seçeneğinde ise adlandırılmamış yüzeyler ve belirli toleransların altında kalan yüzey ve kenarlar göz ardı edilmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda Patch Conforming algoritması seçildikten sonra sayısal analizin akış hacminde daha iyi sonuç vermesi için giriş ve çıkış sınır şartlarının uygulandığı yüzeyler ayrıklaştırma sayısı yöntemiyle tekrardan yapılandırılmıştır. Ağ yapısının modeldeki dairesel kenarlara uygun şekilde yapılandırılması için bir diğer yöntem olarak Curvature size function seçeneği aktif edilmiş ve bu komutun bir alt seçeneği olan Relevance center'ın ise programda seçili olarak sunulan coarse (kötü) modu fine(iyi) olarak değiştirilmiştir. Ağ oluşturma işlemi sonucunda boru kanalı 266 661 elemana ve akış hacmi ise 949 109 elemana ayrıklaştırılmıştır. Farklı diklik ve çarpıklık değerlerine sahip olan eleman sayıları Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 ile sunulmaktadır.



Şekil 5.8. Ayırıklaştırılan elemanların diklik değerleri



Şekil 5.9. Ayırıklaştırılan elemanların çarpıklık değerleri

5.3.3. Sınır şartları

Ayrıklaştırma işleminden sonra Mesh modülünde probleme ait sınır şartlarının uygulanabilmesi için yüzeylerin seçilip sınır şartına uygun olarak adlandırılması gerekmektedir. Burada çözümleme ile ilgili kullanılmak istenen sabitlere ve akış problemine göre seçim yapılmaktadır. Fluent çalışma akışkanının giriş ve çıkış sınır şartı için 10 seçenek sunmaktadır: Velocity inlet, pressure inlet, mass flow inlet, pressure outlet, pressure far-field, outflow, inlet vent, intake fan, outlet vent ve exhaust fan.

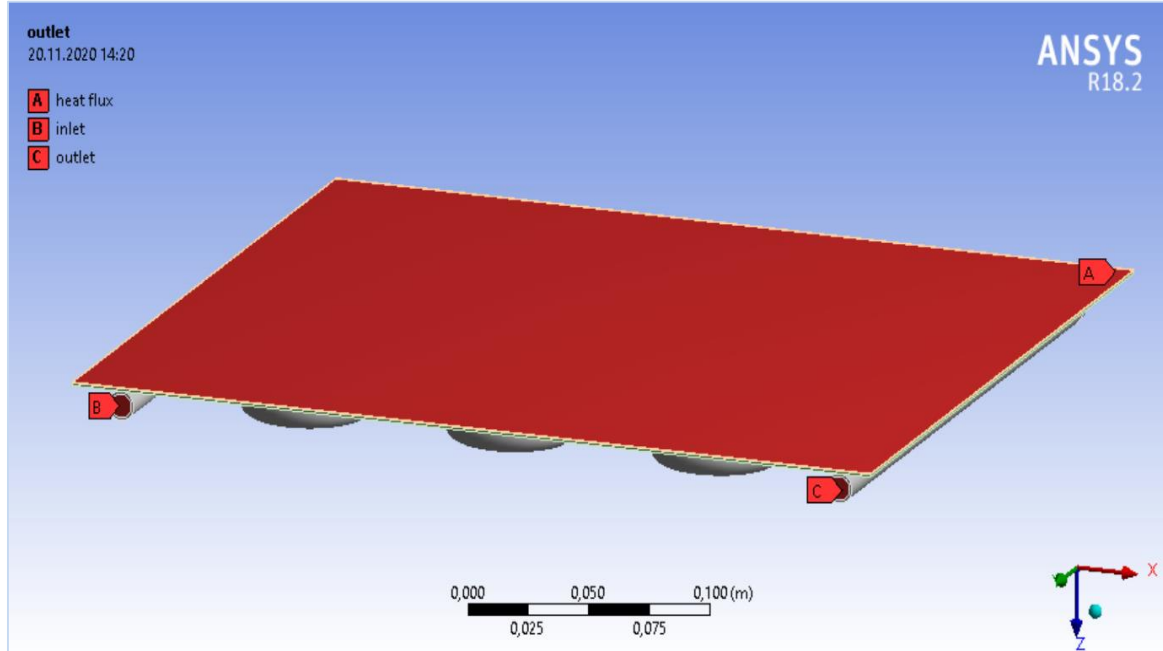
- ✓ Velocity inlet: Akışkanın giriş sınır koşulundaki hız ve skaler özelliklerinin bilindiği durumlarda kullanılmaktadır.

- ✓ Pressure inlet: Akışkanın giriş sınır koşulundaki basınç değeri ve diğer skaler özelliklerinin bilindiği durumlarda kullanılmaktadır.
- ✓ Mass flow inlet: Sıkıştırılabilir akışlarda giriş sınır koşulundaki kütleli debiyi tanımlamak için kullanılmaktadır. Sıkıştırılamaz akışlarda ise yoğunluk sabit olduğu için hız değeri girildiğinde (velocity inlet) program kütleli debiyi hesaplayabildiğinden sabit kütleli debi kullanılmadığı durumlar için gerekli değildir.
- ✓ Pressure outlet: Akışkanın çıkış sınır koşulundaki basınç değeri ve diğer skaler özelliklerinin bilindiği durumlarda kullanılmaktadır.
- ✓ Pressure far-field: Serbest akış Mach sayısı ve belirtilen statik koşullarda sıkıştırılabilir akış modellerinde sonsuzda bir serbest akış koşulu modellemek için kullanılmaktadır.
- ✓ Outflow: Akışkanın çıkış sınır koşulundaki hızı veya basıncının tam olarak bilinmediği akış çözümlerinde kullanılmaktadır. Burada akışın tamamen gelişmiş olduğu varsayımı vardır. Sıkıştırılabilir akış koşulları için uygun değildir.
- ✓ Inlet vent: Kanal girişindeki akış yönü, kayıp katsayıları, sıcaklık ve ortam basıncı gibi değerlerin bilindiği koşullar için kullanılmaktadır.
- ✓ Intake fan: Belirli bir basınç farkı, akış yönü ve ortam (giriş) basıncı bilinen bir fan modeli giriş şartlarını belirlemek için kullanılmaktadır.
- ✓ Outlet fan: Kanal çıkışındaki akış yönü, kayıp katsayıları, sıcaklık ve ortam basıncı gibi değerlerin bilindiği koşullar için kullanılmaktadır.
- ✓ Exhaust fan: Belirli bir basınç farkı, akış yönü ve ortam (çıkış) basıncı bilinen bir fan modeli giriş şartlarını belirlemek için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada giriş sıcaklığı sabit 298 K olan üç çalışma akışkanının 0,02-0,08 m/s giriş hızlarında değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu nedenle giriş sınır şartı olarak “velocity inlet” seçilmiştir.

Çıkış sınır şartı belirlenirken kanal içi akışlarda literatürde iki kullanımı da mevcut olan “outflow” ve “pressure outlet” sınır şartları denenmiştir. Ansys programında çıkışı outflow sınır şartı tanımladığımızda programın çıkış için hesapladığı değerler doğru kabul edilmektedir. Ancak pressure outlet sınır şartı kullanıldığında çıkış yüzeyindeki şartlar programa girilerek çözüm buna uygun şekilde geliştirilmektedir. Outflow ve pressure outlet sınır şartı baz akışkan hesaplamalarında çıkış sıcaklığı değerinde bir fark oluşturmamasına rağmen nanoakışkanların yüksek hız girdilerinde yaklaşık ilk 30 iterasyondan sonra artık değer, yakınsama yapmak yerine artış göstermeye başlamıştır. Bu durum ilerleyen

iterasyonlarda yerini tekrar azalmaya bıraksa da çözümün tamamlanması için gereken iterasyon sayısını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle hesaplamalar pressure outlet sınır şartı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.10. Sınır şartları

Sayısal analizi gerçekleştirilecek olan problemde çalışma akışkanlarının performansı sabit ısı akısı altında incelendiği için bir diğer sınır şartı olarak Heat Flux (ısı akısı) kullanılmıştır. Fotovoltaik termal sistemlerde güneş ışınımı solar hücre tarafından soğurulup elektrik enerjisi üretildiği için heat flux sınır şartı silikon malzeme tanımlanan katmanın üst yüzeyi seçilerek uygulanmıştır. Sınır şartı olarak belirlenen ısı akısının değeri Eş. 5.10 ile hesaplanmıştır. Bu eşitlik kullanılarak sadece özgül ısı, yoğunluk ve ısı iletimi değerlerinin girildiği silikon katman için solar hücrenin emicilik ve (varsa) cam katmanın geçirgenlik değerlerinin hesaba katılması amaçlanmaktadır [5].

$$q_{\text{soğurulan}} = G_t \tau_{\text{cam}} \alpha (1 - \eta) \quad (5.10)$$

Fotovoltaik panel sisteminde cam kullanılmadığı için $\tau_{\text{cam}} = 1$ kabul edilmiştir.

5.3.4. Sayısal analizin gerçekleştirilmesi

Analizi yapılacak olan modelde uygun ağ yapısı oluşturulup, yeterli ağ kalitesine ulaşıldıktan sonra sayısal analiz kısmına geçilmektedir. Fluent modülünün Setup kısmında gerçekleştirilen sayısal analiz işlemleri için aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

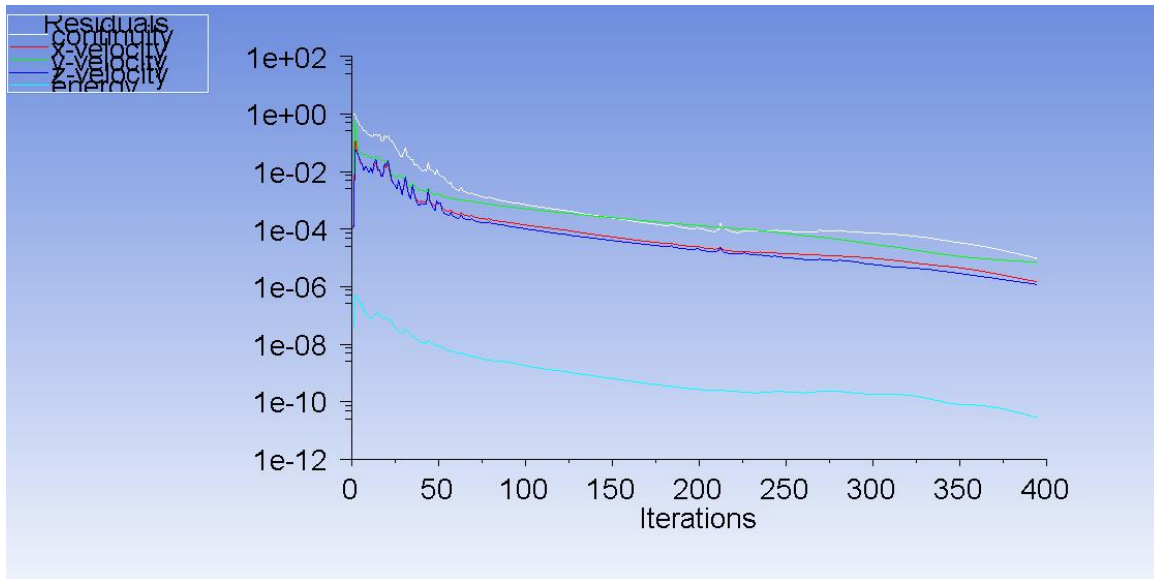
1. Analize başlamadan önce oluşturulan ağ yapısındaki hacim elemanlarının pozitif değerde olup, olmadığı kontrol edilmelidir. Check Mesh komutu ile gerçekleştirilen bu işlem sonucunda, negatif değere sahip bir hacim elemanı olmadığı durumlarda analize devam edilmelidir. Her ne kadar negatif değer olduğu durumlar da çözüm işlemine kadar kullanıcının devam etmesine izin verse de, çözümleme başladığında analizin hata verip sonlanmasına neden olmaktadır. Oluşturulan hacim elemanlarında negatif değere rastlanmamıştır.
2. Isı transfer analizi gerçekleştirilmek istendiği için enerji denklemlerinin de çözüme dahil edilmesini sağlayan Energy(enerji) seçeneği aktif edilmiştir.
3. Akış problemi küçük çaplı boru kanalında ve düşük hızda geliştiği için Laminar (laminer) akış tipi seçilmiştir.
4. Materials (malzemeler) kısmında oluşturulan fotovoltaiik termal sistem katmanlarının Çizelge 5.4'te yer alan termofiziksel özellikleri programa tanımlanmıştır. Fluent yazılımı bu aşamada kütüphanesinde tanımlı farklı sıvı ve katı malzemelerin özelliklerinin de kullanılmasına imkan sağlamaktadır.
5. Cell Zone Conditions (Hücre bölgesi şartları)sekmesi modeldeki katı ve sıvı malzemelerin ilgili hacimlere atanmasını sağlamaktadır. Burada solar hücre, soğurucu plaka ve boru kanalı katı, akış hacmi ise sıvı olarak tanımlanarak Materials kısmında oluşturulan malzemeler ilgili katmanlara tanımlanmıştır.
6. Boundary Conditions (Sınır şartları) sekmesinde Mesh modülünde tanımlanan sınır şartları ile ilgili değerler girilmiştir.
7. Solution Methods (Çözüm yöntemleri) menüsünden hız ve basınç alanlarını ayrı ayrı çözerek bu alanlar arasındaki bağlantıyı düzeltmeler ile oluşturan SIMPLE (Basınca bağlı denklemler için yarı-kapalı yöntem) algoritması seçilmiştir. Basınç için Second Order(İkinci derece), enerji ve momentum denklemlerinin çözümü için ise Second Order Upwind (İkinci derece Upwind) Metotları kullanılmıştır.
8. Solution Initialization (İterasyonlar için ilk değer atama) menüsünde Standard Initialization kullanılarak ilk değer akışkanın hızı seçilmiştir. Daha sonraki iterasyonlarda

bu değerden devam edileceği için hesaplanan bir değer yerine bilinen bir değeri kullanmak daha doğru sonuç verecektir.

9. Son aşama olarak Run Calculation (Hesaplamayı başlatma) seçeneği bulunmaktadır. Burada Number of iterations (iterasyon sayısı) 1000 ve Reporting interval (Raporlama aralığı) 1 olarak seçilmiştir. Böylece her bir adım için artıkların yakınsama değerleri izlenebilmiştir.

5.3.5. Artık değerlerin yakınsaması

HAD analizinde iterasyonların hangi noktaya kadar devam edeceği Monitors(görüntüleme) seçeneğindeki Residual(artık) ile belirlenmektedir. Burada analizin yakınsaması istenen artık değere karar verilmektedir. Artık değer tüm korunum denklemleri için 10^{-5} olarak belirlenmiştir. Bu değer bir iterasyondan diğerine geçildiğinde değişimdeki değişiklik miktarının ölçüsüdür. Çözüm artık devam eden itreasyonlarda artık değerden daha fazla değişmiyor ve kütle, momentum, enerji ve hesaplanan skaler değerler denge haline ulaşıyorsa yakınsama gerçekleşmektedir. Yapılan çalışma kapsamında sayısal analizlerin ortalama 300 iterasyonda yakınsama gösterdiği ve çalışma akışkanının hızı arttıkça iterasyon sayısında artış olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.11 0,06 m/s hıza sahip su için yaklaşık 400 iterasyonda artık değer 10^{-5} değerine yakınsadığını ifade etmektedir.



Şekil 5.11. 0,06 m/s akış hızındaki suya ait olan iterasyon sayısı

5.3.6. Sonuçların görüntülenmesi

Fluent yazılımı sayısal analizler gerçekleştirildikten sonra elde edilen sonuçları hem sayısal hem de grafiksel olarak kullanıcıya sunmaktadır. Son işlemci (postprocessor) olarak adlandırılan bu bölümde gerçekleştirilen analizin her adımı için tüm sonuçların bir kopyası çıktı dosyası halinde program dışına aktarılabilir. Büyük bir CFD problemi söz konusu olduğunda, örneğin 100 000'den fazla hücre olması durumunda, kullanıcının bu dosyayı tek tek okumak yerine problemin genelini kapsayacak ortalama, minimum ve maksimum değerleri incelemesi ve görsel sonuçları değerlendirmesi daha kolay olmaktadır. CFD çözücüsünden aldığı bilgileri, akış alanının tamamı veya bir kısmı için elde ettiği değişken değerlerini kullanıcının bilgisayar ekranında grafiksel olarak görüntüleyebilmesi için kullanılmaktadır. Böylece son işlemci adımı ile akışkan içindeki hız, basınç ve sıcaklık dağılımlarını aynı anda görmek mümkündür. Ayrıca grafiksel sunum yöntemleri vektör çizimlerini (akış yönünü gösteren ölçekli bir ok) ve alan boyunca iki boyutlu bir ara yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımını görme, görüntüyü 3 boyutlu alanda döndürme veya ilgi alanlarına yakınlaştırma seçeneğini de sunmaktadır. Hem görsel hem de sayısal sonuçları birleştirmek, gerçekleştirilen akış probleminin en uygun değerlendirmesinin yapılmasını sağlamaktadır [71]. Bölüm 6'da gerçekleştirilen akış analizi için elde edilen sonuçların sayısal değerleri ve görsel çıktıları bir arada sunulmuştur.

5.4. Ağ Yapısından Bağımsızlık

Ağ bağımsızlık analizi, bir çözümün geometri ızgara boyutundan bağımsız olduğunu göstermek için kullanılmaktadır. Akış analizi sürecindeki ilk adım oluşturulan geometride ağdan bağımsız bir akış alanı elde etmek için ideal ağ yapısının ne olduğunu tespit etmektir. Ağ kalitesi çözümün doğruluğu, yakınmasa oranı ve çözümün süresi ile doğrudan ilişkilidir. Ağ boyutu arttıkça programın bilgisayar belleğinde kullandığı alan artarak çözümü yavaşlatmaktadır. Bu nedenle belirlenen çözüm kriterindeki sonucun yapılan değişikliklere rağmen küçük oranlarda değişim gösterdiği ağ yapısı ideal olarak kabul edilebilir ve ağ yapısını daha fazla inceltmeye gerek duyulmaz.

Bu çalışmada yapılan ağdan bağımsızlık işlemi için ısı analizinin ana unsuru olan ısı akışı yönünde ağ yapısı yoğunlaştırılarak dört farklı ağ yapısı elde edilmiştir. Çalışma akışkanı olarak 298 K giriş sıcaklığında su kullanılarak çıkış sıcaklığındaki değişim miktarı

karşılaştırılmıştır. Farklı ağ yapılarına karşılık gelen ortalama ağ kalitesini gösteren değerler ve çıkış sıcaklığındaki değişimler Çizelge 5.5'te sunulmuştur.

Çizelge 5.5. Farklı ağ yapılarına ait değerler

Ağ Yapıları	Ağ Kalitesi Göstergeleri		Ağ Yapısı Değerleri	Akışkanın Çıkış Sıcaklığı (K)
	Diklik	Çarpıklık	Eleman Sayısı	
Ağ yapısı I	0,875	0,151	678 972	302,872
Ağ yapısı II	0,958	0,055	1 368 343	302,958
Ağ yapısı III	0,975	0,058	3 227 720	302,988
Ağ yapısı IV	0,977	0,058	3 427 810	303,993

Çizelge 5.5'te görüldüğü üzere farklı ağ yapıları ile yapılan analizler sonucunda Ağ yapısı III ile diğer yapılar arasında maksimum % 0,038'lik bir değişiklik meydana gelmiştir. Hem ağ yapısının kalitesi hem de çözüm süresi hesaba katılarak Ağ yapısı III çözüm için ideal kabul edilip çalışmalar bu ağ yapısında gerçekleştirilmiştir.

6. HAD ANALİZ SONUÇLARI

Çalışma akışkanı olarak üç farklı akışkan çeşidi kullanılarak elektrik enerjisi ve ısı enerjisi üreten bir fotovoltaiik termal sistemin sayısal analizinin gerçekleştirildiği bu tez çalışmasında; solar hücre, soğurucu plaka ve çalışma akışkanının geçeceği boru kanalı modeli oluşturulmuştur. Tasarlanan fotovoltaiik modül 330*350 mm en-boy ölçüleri ile 0,1155 m²’ lik bir panel yüzeyi sağlamaktadır. Sabit 1000 W/m² ısı akısı altında değerlendirilmesi yapılan sistemde çalışma akışkanlarının farklı hızlardaki performansları sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla 0,02-0,08 m/s aralığında değişen hıza sahip su, CuO+Fe/su ve CuO/su nanoakışkanının panel yüzeyinde meydana getirdiği soğuma ve buna bağlı olarak akışkanın çıkış koşullarındaki sıcaklık artışı görsel sonuçlar ile ortaya konulmuştur. Her çalışma akışkanı için fotovoltaiik panelde ulaşılan ısı verimlilik, elektriksel verimlilik, borularda meydana gelen basınç düşüşü, ve toplam verimlilik değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Ayrıca sayısal analiz sonucunda elde edilen veriler performans parametrelerinin değerlendirilmesinde kullanılarak, sonuçlar yorumlanmıştır.

6.1. Çalışma Akışkanlarında Akışı Etkileyen Özelliklerin Hesaplanması

Nanoakışkanlar sahip oldukları nano boyutlu parçacıklar sayesinde baz akışkanın termofiziksel ve ısı transfer özelliklerinde değişimlere neden olmaktadır. Seçilen nanoparçacıkların türüne göre değişebilen bu etkiler kullanılan sistemde baz akışkana kıyasla olumlu ve olumsuz sonuçlar oluşturmaktadır. Araştırmacılar iki veya daha çok nanoparçacık içeren hibrit nanoakışkanlar kullanarak bireysel süspansiyonların avantaj ve dezavantajları arasında bir değişim sağlayarak, ısı transferi ve basınç düşüşü özelliklerinde iyileşme hedeflemektedir.

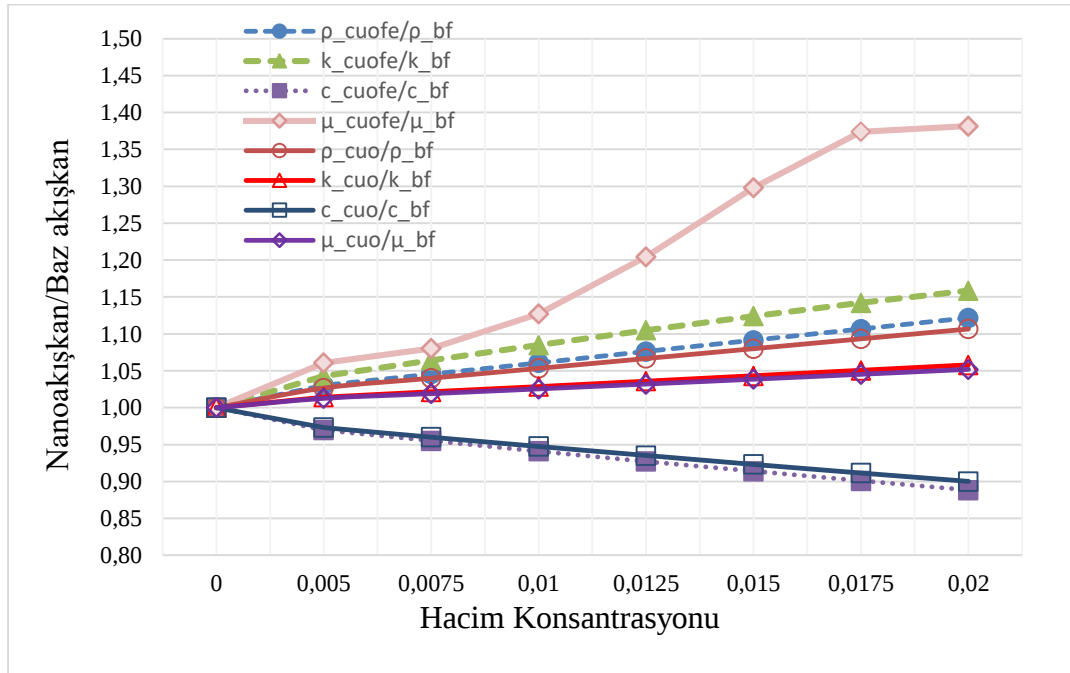
Bu çalışmada özellikleri literatürden alınan parçacık boyutu 38 nm olan CuO ve 30-40 nm olan Fe nanoparçacıkları tekli ve hibrit nanoakışkan elde etmek için kullanılmıştır. CuO ve Fe’nin saflık oranları sırası ile %99,99 ve %99,55’dir [72]. Nanoparçacıkların 298 K’deki diğer özellikleri Çizelge 6.1 ile sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Nanoparçacıkların özellikleri

	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Özgül Isı (J/kgK)
Bakır Oksit (CuO)	6320	32,9	531
Demir (Fe)	7800	76,2	440

Bakır oksit ve demir nanoparçacıkların kullanımı birbirine göre farklı avantaj ve dezavantajlar sunmaktadır. Bakır oksit nanoparçacığının yoğunluk değerinin daha küçük olması nanoakışkan kararlılığını olumlu yönde etkilerken, çalışma akışkanı sirkülasyonu için gerekli olan pompa gücünün de azalmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra demir nanoparçacığının sahip olduğu yüksek ısı iletkenlik (bakır oksite kıyasla yaklaşık 2,5 kat), oluşturulan nanoakışkanın baz akışkana kıyasla daha yüksek ısı iletkenlik değerine sahip olmasını sağlamaktadır. Ayrıca daha düşük özgül ısısının olması ise akışkanın sıcaklığını artırmak için gerekli olan enerji miktarını düşürerek akışkanın sistemden daha yüksek sıcaklık değeri ile çıkmasını sağlamaktadır.

Nanoparçacık türlerine karar verdikten sonra çalışmada kullanılacak parçacık hacim konsantrasyonunu belirlemek için öncelikle % 0,5-% 2 hacim konsantrasyonları arasındaki değişimin çalışma akışkanı özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 6.1. Nanoakışkanların baz akışkana kıyasla termofiziksel özelliklerindeki değişim

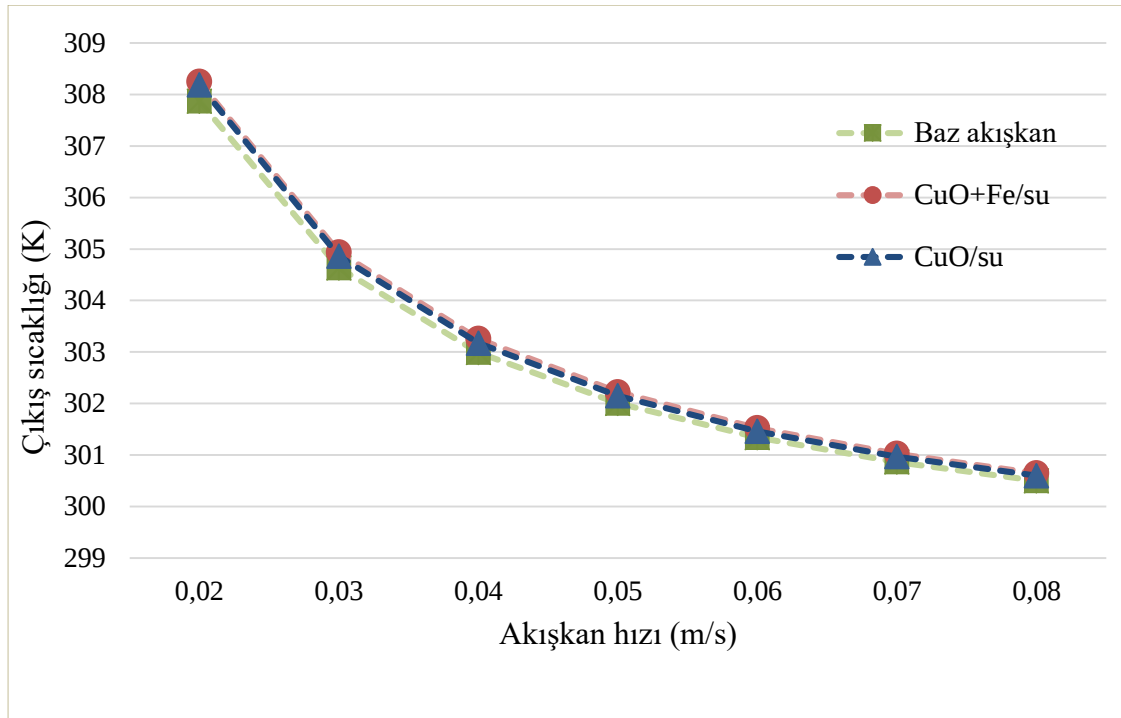
Şekil 6.1'e göre hacim konsantrasyonundaki artış ısı iletkenlik ve yoğunluk üzerinde artan bir eğilime neden olmaktadır. Baz akışkana CuO+Fe ve CuO nanoparçacıklarının eklenmesi sırası ile hacim konsantrasyonu % 0,5'ten % 2'ye doğru artarken ısı iletkenlik için % 4 - % 15,8 ve % 1-% 5,8 oranında artış sağlamış, bu durum yoğunluk için % 3-% 12 ve % 2,7-% 10 oranında olmuştur. Ancak özgül ısıya bakıldığında hacim konsantrasyonu arttıkça özgül ısının azaldığı görülmektedir. Bu azalma nanoparçacıkların özgül ısısının suya oranla daha düşük olması ile açıklanabilmektedir. Hacim konsantrasyonunun artmasının bir diğer sonucu ise viskoziteyi arttırmasıdır. Tekli nanoakışkan için artışın maksimum % 5,2 olduğu görülürken bu değer hibrit nanoakışkan için % 38'dir. Viskozitedeki artışın çalışma akışkanı ve akış kanalı arasındaki sürtünmeyi ve gerekli pompa gücünü artırması ve literatürde hibrit nanoakışkanlar için türetilen eşitliklerin daha düşük konsantrasyonlarda hata oranının azalması nedeni ile hacim konsantrasyonu nanoakışkanlar için % 2 olarak belirlenmiştir. Bölüm 4'te sunulan eşitlikler ile hesaplanan % 2 (50:50) hacim konsantrasyonu için CuO+Fe/su ve CuO/su nanoakışkanının ve baz akışkan olarak kullanılan suyun özellikleri Çizelge 6.2 ile verilmektedir.

Çizelge 6.2. Çalışma akışkanlarının özellikleri

	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Özgül Isı (J/kgK)	Viskozite (kg/ms)
CuO+Fe/su	1118,26	0,703	3712,9	0,00123
CuO/su	1103,46	0,642	3762	0,00094
Su	997	0,607	4180	0,00089

6.2. Isıl Verimliliğe Etkisi

Isıl sistemlerde enerji verimliliği başlıca dört parametreden etkilenmektedir. Bunlar çalışma akışkanının özgül ısısı, giriş hızı, sisteme giriş ve sistemden çıkış sıcaklığı ve bunlara bağlı olarak panel tarafından soğurulan ısı enerjisi miktarıdır. Değerlendirme sabit ısı akısı ve giriş sıcaklığında gerçekleştiği için çalışma akışkanlarının verimlilik değişiminin ana etkeni çıkış sıcaklığı (özgül ısıların etkisi ile) ve hız değeri ile değişen kütsel debisi olmaktadır.



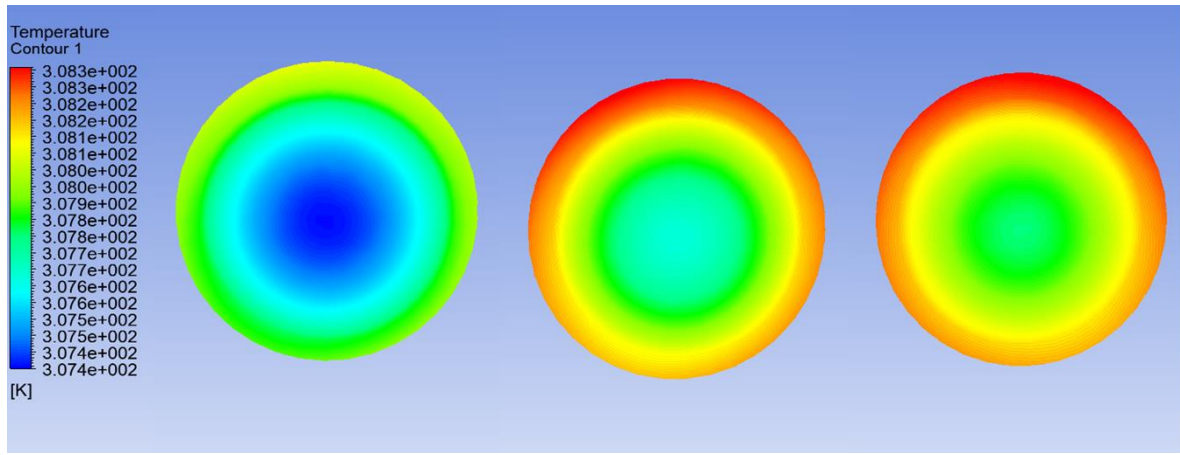
Şekil 6.2. Çıkış sıcaklıklarının farklı akış hızlarındaki değişimi

Şekil 6.2’de üç çalışma akışkanında da çıkış sıcaklığının akışkan hızının artışı ile birlikte azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Düşük akış hızlarında çalışma akışkanının kanal içerisinde daha fazla kalması nedeniyle çalışma akışkanı daha fazla ısınmaktadır. Daha yüksek akış hızlarında ise soğurulan ısının artmasına rağmen kütleli debinin de artmasıyla birim debi başına düşen ısı enerji miktarı azalmakta ve çıkış sıcaklığını düşürmektedir. CuO ve CuO+Fe nanoparçacıklarının baz akışkana eklenmesi baz akışkana kıyasla fotovoltaiik termal sistemde nanoakışkanların daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmasına neden olmuştur. Aradaki bu fark nanoakışkanların daha fazla ısı çekmesi ve suyun yüksek özgül ısısı nedeniyle daha geç ısınması ile oluşmaktadır.

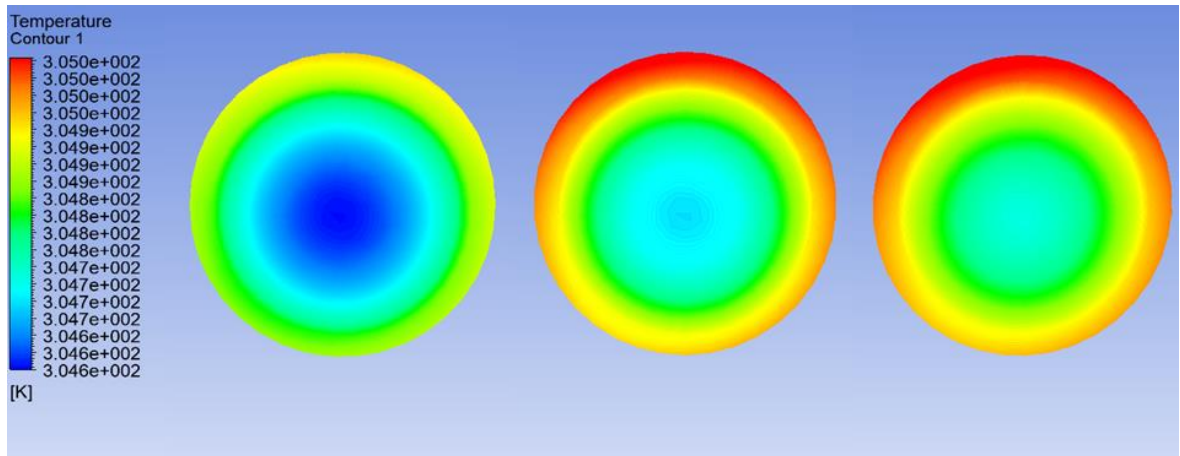
0,02 m/s akış hızındaki ortalama çıkış sıcaklıklarına bakıldığında bu değer sırasıyla su, CuO+Fe/su ve CuO/su için 307,87 K, 308,24 K ve 308,18 K olurken 0,08 m/s akış hızında 300,5 K, 300,65 K ve 300,6 K olmuştur. Daha düşük hızlarda çalışma akışkanları kıyaslandığında sıcaklık farkının daha belirgin olmasına karşın akışkan hızı arttıkça aradaki fark azalmış ve neredeyse aynı sıcaklığa yaklaşmışlardır.

Fluent Reports (Sonuçlar) modülünden Bölüm 5’de bahsedildiği gibi çıkış sınır şartı olarak belirlenen akış hacmi yüzeyindeki sıcaklık dağılımının görsel sonuçlarına

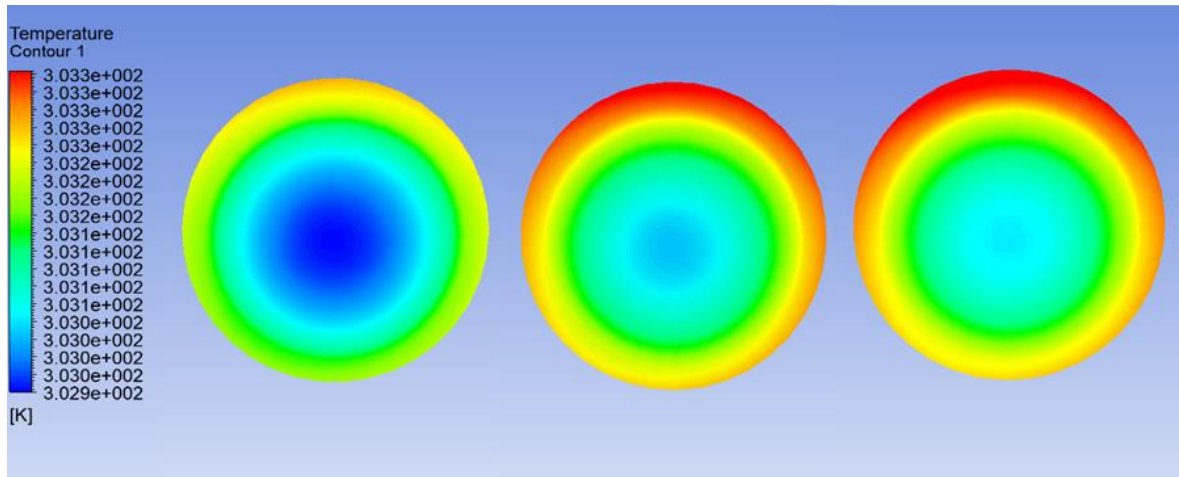
ulaşılabilmektedir. Aynı akış hızı değeri için üç çalışma akışkanına ait sonuçlar Şekil 6.3 ve Şekil 6.9 arasında sunulmaktadır. Şekillerde her akış hızı için çıkış sınır şartının uygulandığı yüzey sırasıyla baz akışkan, CuO/su ve CuO+Fe/su akışkanına aittir. Sonuçlar sunulurken sıcaklık göstergesinin sınırları User Define (kullanıcı tanımlı) seçeneği ile aynı hıza sahip üç çalışma akışkanı arasındaki en büyük ve en küçük değer atanarak belirlenmiştir. En küçük ve en büyük değer her akış hızı için sırasıyla suya ve CuO+Fe/su nanoakışkanına karşılık gelmiştir. Bu değer aralığı seçimi ile çalışma akışkanları arasında olan sıcaklık dağılımındaki değişimin daha net anlaşılması amaçlanmaktadır.



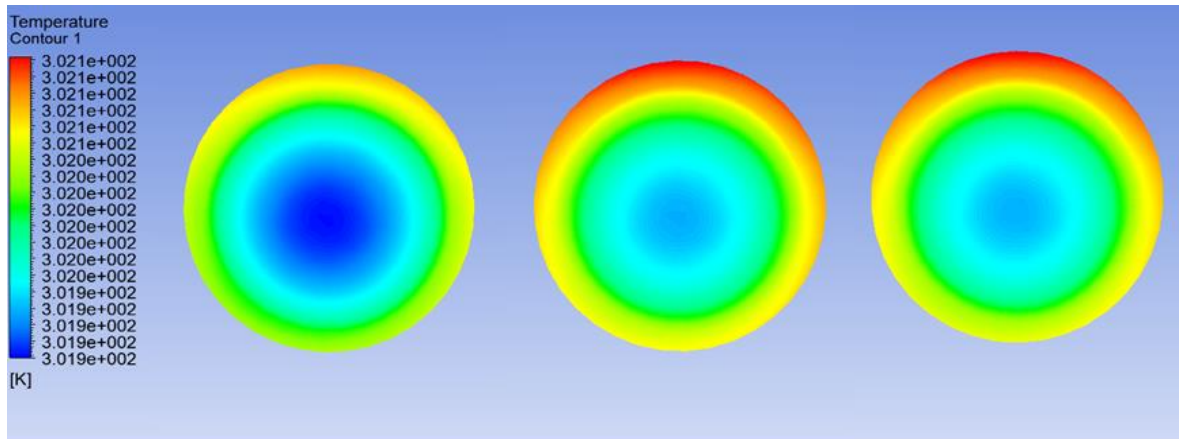
Şekil 6.3. 0,02 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı



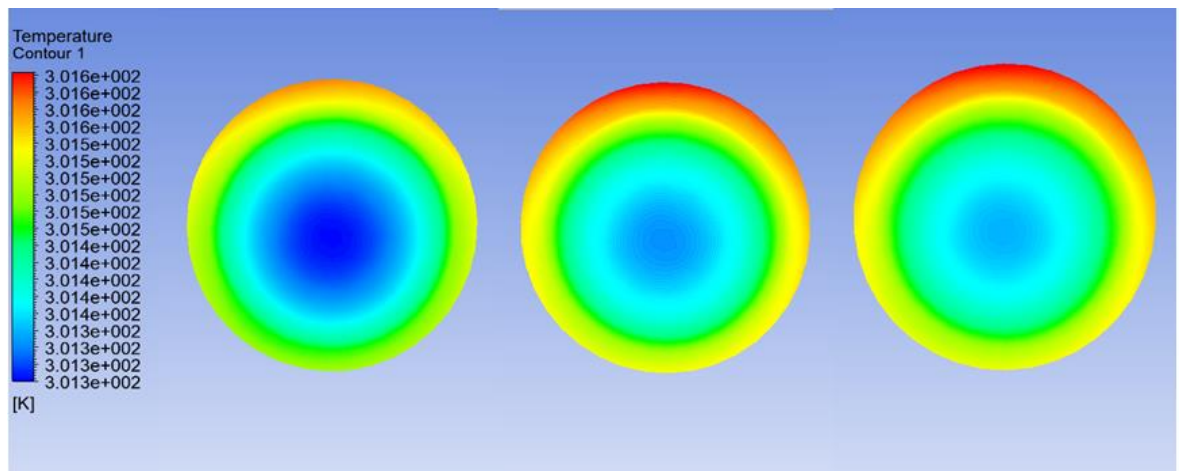
Şekil 6.4. 0,03 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı



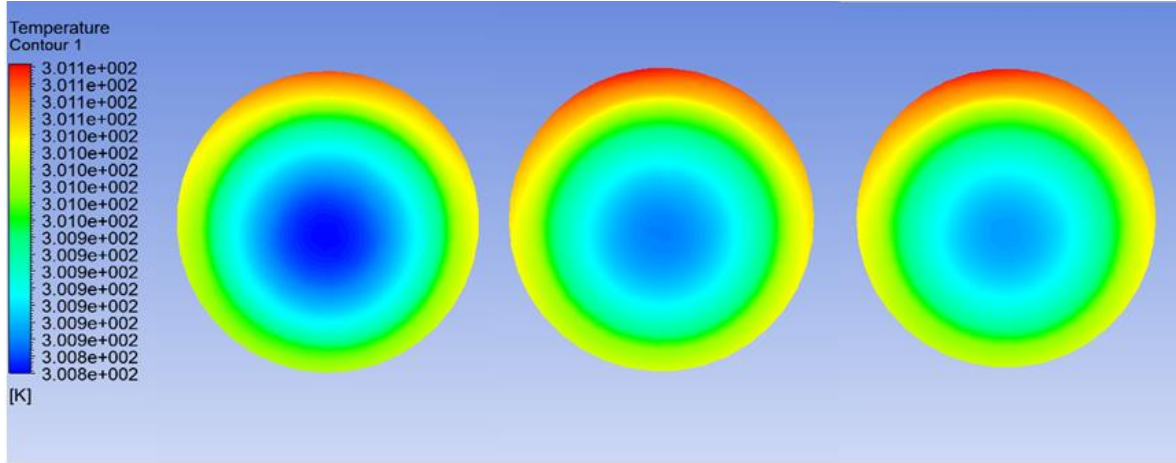
Şekil 6.5. 0,04 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı



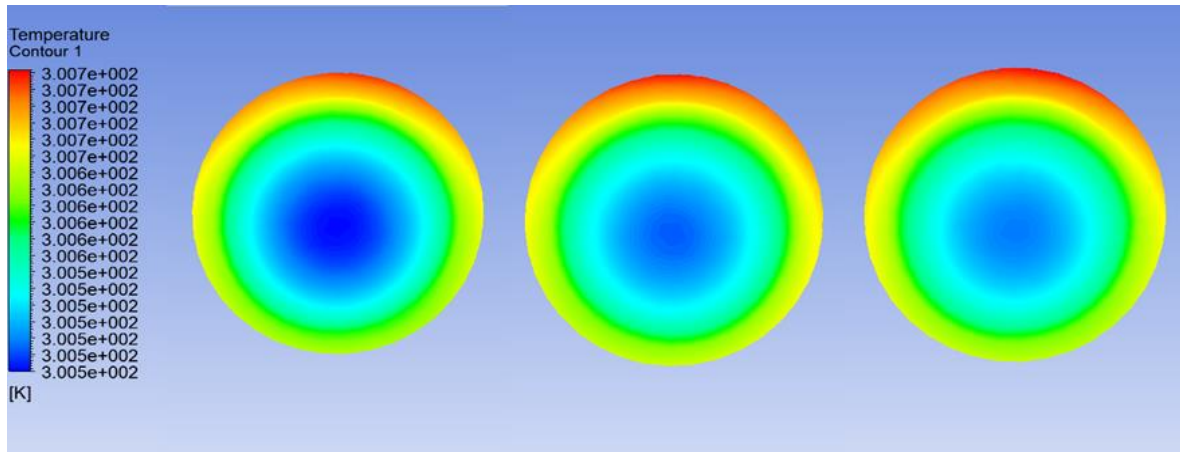
Şekil 6.6. 0,05 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı



Şekil 6.7. 0,06 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı



Şekil 6.8. 0,07 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı



Şekil 6.9. 0,08 m/s akış hızında çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı

Şekil 6.3 ve Şekil 6.9 arasındaki görsel çıktıları bakıldığında çalışma akışkanlarının hızındaki artışın çıkış sınır şartına ait yüzeydeki en büyük ve en küçük değer arasındaki farkı azaltarak sıcaklık dağılımlarını benzer hale getirdiği görülmektedir. Ancak akışkan hızı en yüksek olduğu değerde (0,08 m/s), diğer bir değişle sıcaklıkların birbirine en yakın olduğu değerde bile hibrit nanoakışkanın çıkış yüzeyindeki sıcaklık dağılımının tekli nanoakışkan ve baz akışkana kıyasla daha dengeli olduğu görülmektedir. Bu durum çalışma akışkanlarının ısı yayılım katsayıları ile açıklanabilmektedir. Isı yayılım katsayısı, malzeme içerisinde ısının ne kadar hızlı yayıldığına bir göstergesidir. İletilen ısının depolanan ısıya oranı olarak tanımlanan ısı yayılım katsayısı bağıntısı Eş. 6.1’de verilmektedir.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (6.1)$$

Çalışma akışkanları için ısı yayılım katsayıları Eş. 6.2, Eş. 6.3 ve Eş. 6.4 ile hesaplanmıştır.

$$\alpha_{\text{su}} = \frac{0,607 \text{ W/mK}}{997 \text{ kg/m}^3 \cdot 4180 \text{ J/kgK}} = 1,45 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad (6.2)$$

$$\alpha_{\text{CuO/su}} = \frac{0,642 \text{ W/mK}}{1103,46 \text{ kg/m}^3 \cdot 3762 \text{ J/kgK}} = 1,55 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad (6.3)$$

$$\alpha_{\text{CuO+Fe/su}} = \frac{0,703 \text{ W/mK}}{1118,26 \text{ kg/m}^3 \cdot 3712,9 \text{ J/kgK}} = 1,69 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad (6.4)$$

CuO+Fe/su akışkanının diğer iki çalışma akışkanına kıyasla ısı yayılım katsayısının daha yüksek olması çıkış yüzey alanında ısının en sıcak ve en soğuk nokta arasındaki iletiminin daha hızlı gerçekleştiği anlamına gelmektedir.

Sayısal analiz sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri aracılığıyla fotovoltaiik termal sistemin farklı akışkan türleri ve farklı akış hızlarında sahip olduğu ısı verim hesaplanabilmektedir. Bölüm 3.1’de Eş. 3.3 ve Eş. 3.4 ile belirtilen denklemler kullanılarak 0,08 m/s akış hızındaki su, CuO+Fe/su ve CuO/su çalışma akışkanları ile elde edilen ısı verimlilik değerleri hesaplanmıştır:

$$Q_{\text{su}} = 0,00505 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot (300,5-298)\text{K} = 52,77 \text{ W} \quad (6.5)$$

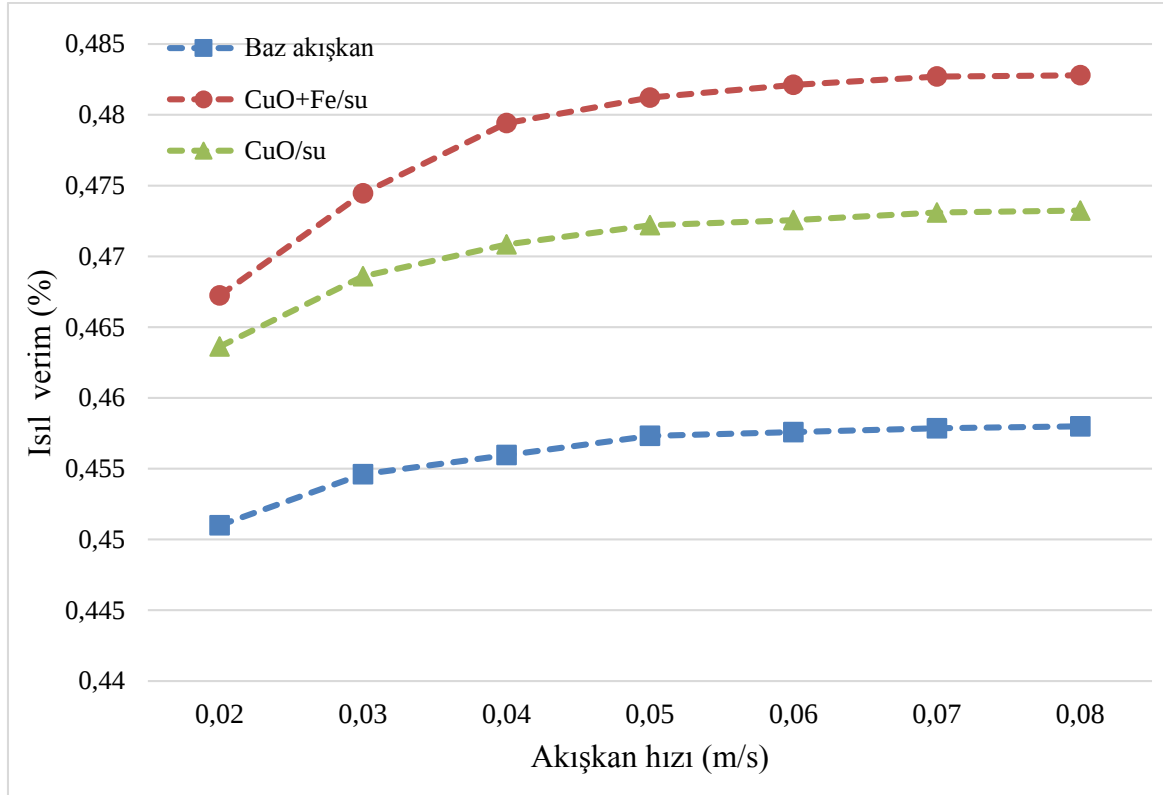
$$\eta_{\text{th,su}} = \frac{52,77 \text{ W}}{0,1155 \text{ m}^2 \cdot 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 0,457 \quad (6.6)$$

$$Q_{\text{CuO/su}} = 0,00559 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 3762 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot (300,6-298)\text{K} = 54,67 \text{ W} \quad (6.7)$$

$$\eta_{\text{th,CuO/su}} = \frac{54,67 \text{ W}}{0,1155 \text{ m}^2 \cdot 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 0,473 \quad (6.8)$$

$$Q_{\text{CuO+Fe/su}} = 0,00567 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 3712,9 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot (300,65-298)\text{K} = 55,79 \text{ W} \quad (6.9)$$

$$\eta_{\text{th,CuO+Fe/su}} = \frac{55,79 \text{ W}}{0,1155 \text{ m}^2 \cdot 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 0,483 \quad (6.10)$$



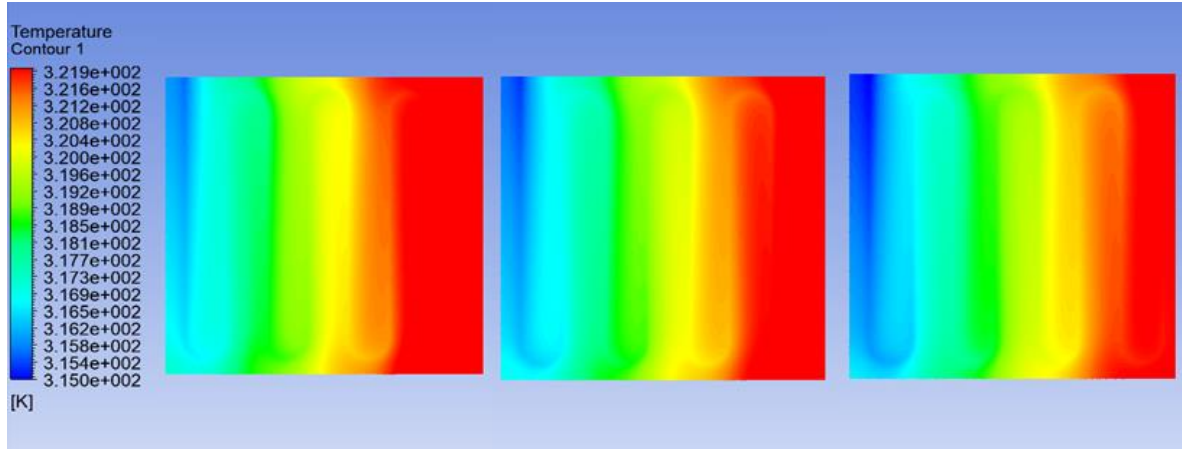
Şekil 6.10. Isıl verimin farklı akış hızlarındaki değişimi

Şekil 6.10 baz akışkana kıyasla tekli ve hibrit nanoakışkanın ısı performansının daha iyi olduğunu göstermektedir. 0,02 m/s hızdan 0,08 m/s hıza doğru artış sağlandığında ısı verimlilikteki artış baz akışkana kıyasla CuO+Fe/su nanoakışkanı için % 3,6' den % 5,42' ye ve CuO/su nanoakışkanı için ise % 2,8' den % 3,32' ye ulaşmıştır. Hibrit nanoakışkan kullanımı ile tekli nanoakışkana kıyasla ısı verimlilik %2 oranında artış elde edilmiştir. 0,02-0,06 m/s aralığında ısı verimlilikteki artış su için % 1,46, CuO+Fe/su için % 3,19, CuO/su için ise % 1,93 olmuştur. Bu değer aralığında belirgin olan artış 0,06-0,08 m/s akış hızı aralığında su için % 0,89, CuO+Fe/su ve CuO/su için % 1,4 olmuştur. Üç çalışma akışkanı içinde yaklaşık olarak 0,004 kg/s kütleli debiden sonra oluşan bu etki benzer şekilde Chow' un yaptığı çalışmada su için 0,01 kg/s kütleli debiden sonra oluşmuştur [73]. Farklı kütleli debiler, kullanılan solar hücrenin ve boru kanalının boyutu ile akışkanın giriş sıcaklığı farklılığından meydana gelmektedir.

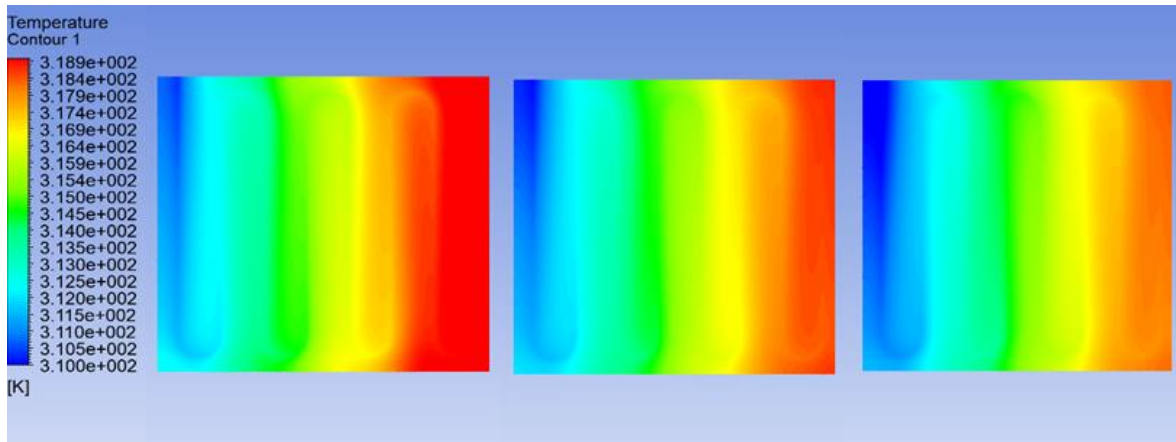
6.3. Elektriksel Verimliliğe Etkisi

Fotovoltaik termal sistemlerin başlıca amacı solar hücrenin çalışma sıcaklığının azaltılarak elektriksel verimde artış sağlanmasıdır. Tipik bir solar hücrenin elektriksel verimi hücrenin

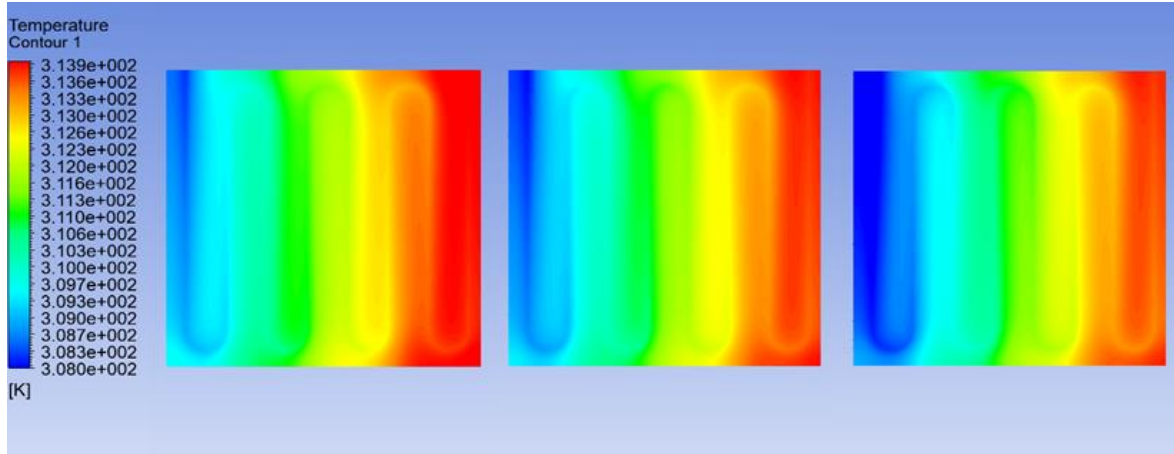
sıcaklığı ve ısı akısı miktarı gibi birkaç parametreden etkilenmektedir. Şekil 6.11 ve Şekil 6.17 arasında solar hücredeki sıcaklık dağılımının üç çalışma akışkanına ait farklı hızlardaki görsel sonuçları sunulmaktadır. Sonuçlar Results modülünde üç çalışma akışkanı ve her akış hızı için (0.0.0,26854) koordinatlarına Plane(yüzey) eklemesi yapılarak elde edilmiştir. Şekillerde her akış hızı için belirlenen yüzey sırasıyla baz akışkan, CuO/su ve CuO+Fe/su akışkanına aittir. Sonuçlar sunulurken sıcaklık göstergesinin sınırları User Define (kullanıcı tanımlı) seçeneği ile aynı hız değeri için solar hücrenin sahip olduğu en küçük ve en büyük değer atanarak belirlenmiştir. En küçük ve en büyük değer her akış hızı için sırasıyla CuO+Fe/su nanoakışkanına ve su baz akışkanına karşılık gelmiştir. Bu değer aralığı seçimi ile solar hücrede meydana gelen soğumanın daha net anlaşılması amaçlanmaktadır.



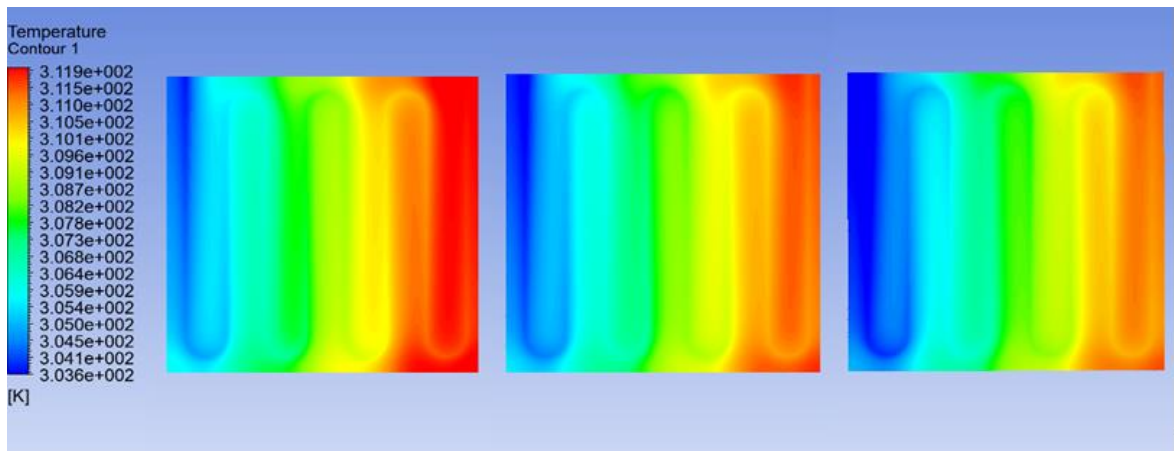
Şekil 6.11. 0,02 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı



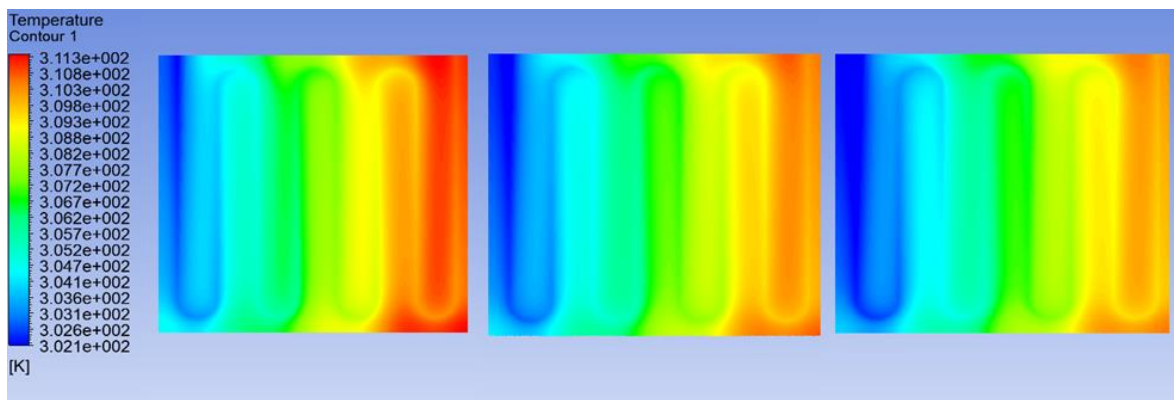
Şekil 6.12. 0,03 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı



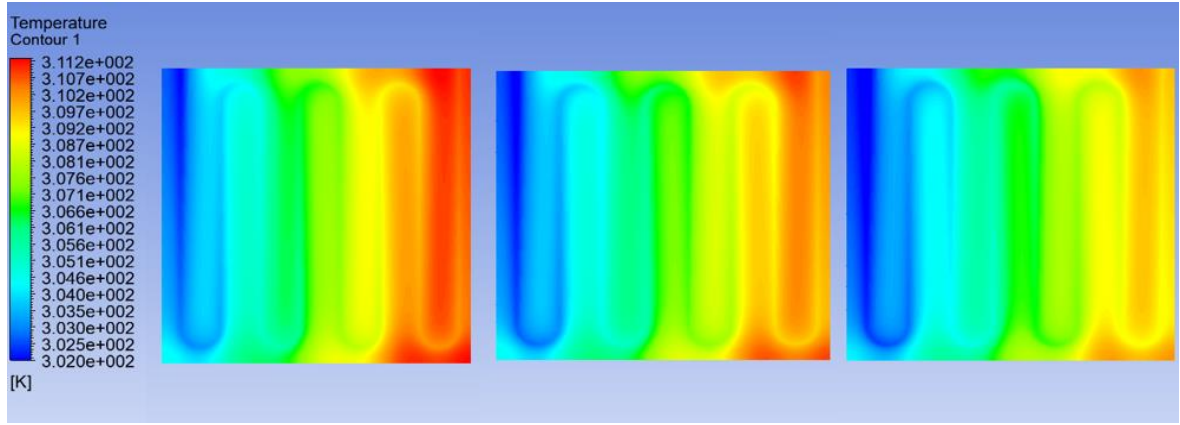
Şekil 6.13. 0,04 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı



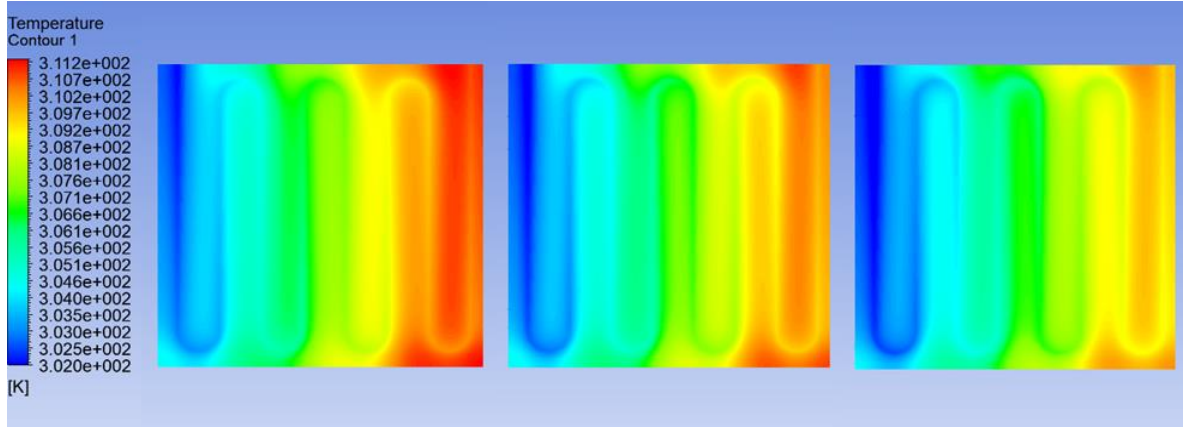
Şekil 6.14. 0,05 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı



Şekil 6.15. 0,06 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı



Şekil 6.16. 0,07 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı



Şekil 6.17. 0,08 m/s akış hızında panel sıcaklık dağılımı

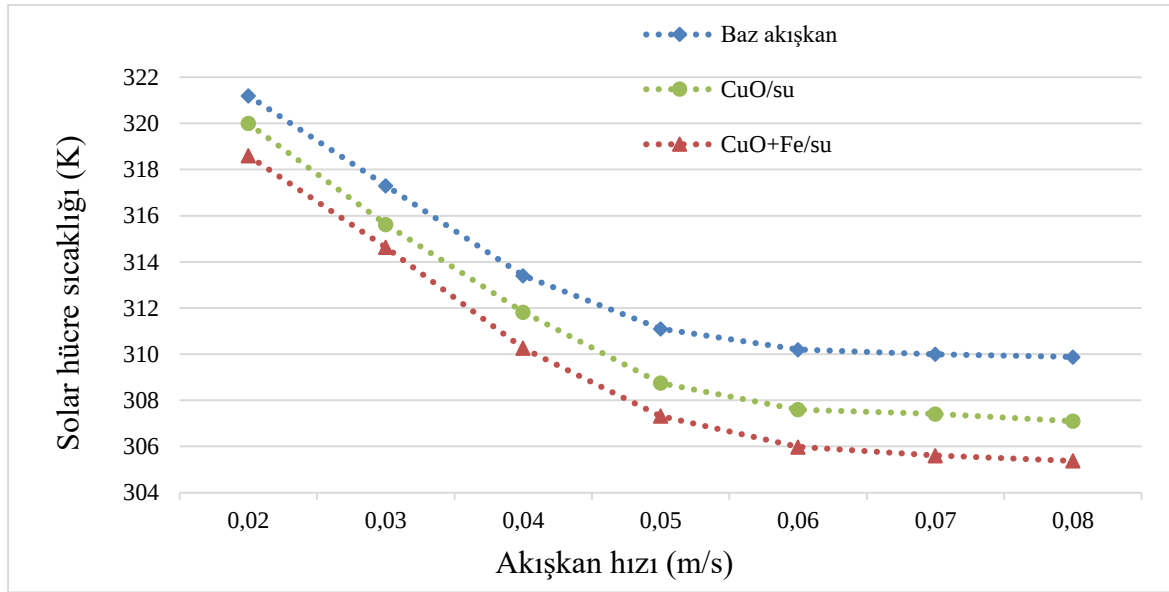
Sonuçlar akışkan hızının artışına bağlı olarak solar hücre sıcaklığının azaldığını göstermektedir. Solar hücre sıcaklığında akışkan hızı 0,02 m/s' den 0,08 m/s' ye doğru artarken maksimum sıcaklık farkı su, CuO/su ve CuO+Fe/su için sırasıyla 11,3 °C, 12,9 °C ve 13,2°C olmuştur. CuO+Fe/su nanoakışkanının diğer iki akışkana kıyasla daha yüksek ısı iletkenlik değerine sahip olması sıcaklık farkının da daha fazla olmasına neden olmuştur.

Farklı çalışma akışkanlarına ait 0,08 m/s çalışma akışkanı giriş hızındaki fotovoltaik termal sistemin elektriksel verimi Bölüm 3.1'de Eş. 3.2 ile belirtilen eşitlik kullanılarak elde edilmiştir. Denklemde sıcaklık farkı kullanıldığı için Kelvin ile belirtilen sıcaklık değerlerinde birim dönüştürme işlemi uygulanmamıştır.

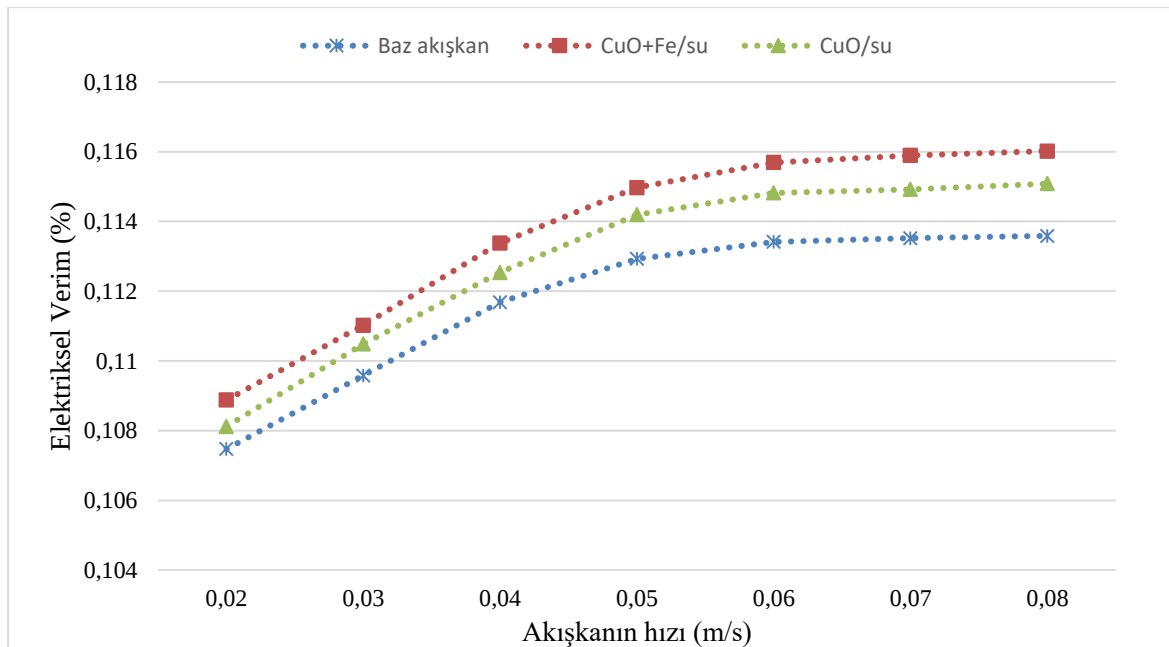
$$\eta_{e,su} = 0,12 \left[\left(1 - 0,0045 \frac{1}{^{\circ}\text{C}} (309,9 - 298) \text{K} \right) \right] = 0,1136 \quad (6.11)$$

$$\eta_{e, \text{CuO/su}} = 0,12[1-0,0045 \frac{1}{^{\circ}\text{C}} (307,1-298)\text{K}] = 0,1151 \quad (6.12)$$

$$\eta_{e, \text{CuO+Fe/su}} = 0,12[1-0,0045 \frac{1}{^{\circ}\text{C}} (305,4-298)\text{K}] = 0,1160 \quad (6.13)$$



Şekil 6.18. Solar hücre sıcaklıklarının farklı akış hızlarındaki değişimi



Şekil 6.19. Elektriksel verimin farklı akış hızlarındaki değişimi

Akış hızının artmasına bağlı olarak kütsel debinin de artması solar hücreden daha fazla ısı çekilmesini dolayısıyla üç çalışma akışkanı içinde elektriksel verimin artmasını sağlamıştır.

CuO+Fe/su akışkanının sağladığı % 11,6 elektriksel verim baz akışkana kıyasla % 2,14 iyileşme sağlarken bu oran CuO/su akışkanı için % 1,32 olmuştur.

Çalışma akışkanının daha fazla ısınması ve solar hücrenin daha fazla soğuması ile ısı dengeye yaklaştıran bu durum solar hücre ve çalışma akışkanı arasındaki sıcaklık farkını azaltmıştır. 0,02 m/s akış hızından CuO+Fe/su, CuO/su ve suyun çıkış sıcaklığı ve solar hücre arasındaki fark sırası ile 10,36 °C, 11,76 °C, 13,33°C iken 0,08 m/s hıza gelindiğinde 4,73 °C, 6,50 °C ve 9,37 °C olmuştur.

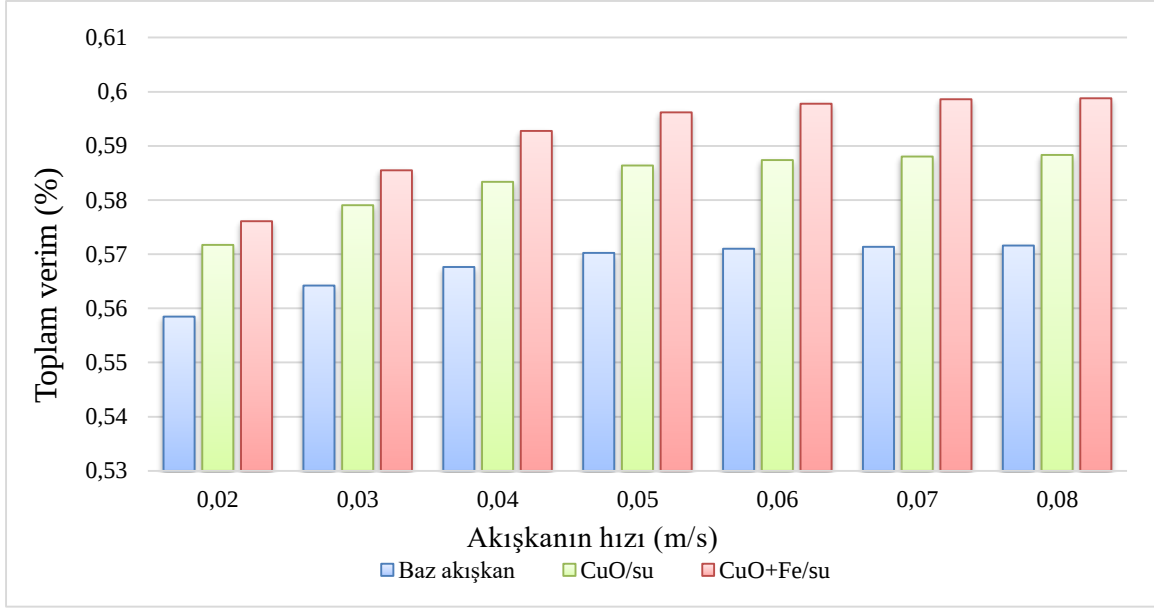
6.4. Toplam Verime Etkisi

Fotovoltaik termal sistemler eş zamanlı olarak ısı ve elektrik enerjisi elde edebildiğimiz güneş enerjisi sistemleridir. Bu nedenle sistemin maruz kaldığı ısı akısı aynı şekilde eş zamanlı olarak iki tür enerjiye dönüşebilmektedir. Bölüm 3’de Eş. 3.1 ile tanımlandığı gibi bu sistemlerin toplam verimliliği PV/T sistemi oluşturan kolektör ve solar hücrenin sahip olduğu verimlerin birleşimi olarak belirtilebilmektedir. Şekil 6.20 üç çalışma akışkanına ait farklı hızlardaki toplam verimi göstermektedir. Akışkan hızının artması Bölüm 6.2 ve 6.3’te de belirtildiği gibi sistemin elektriksel ve ısı verimliliğini arttırmaktadır. Bu nedenle toplam verim de akışkan hızının artmasından olumlu şekilde etkilenmektedir. 0,02 m/s akış hızından CuO+Fe/su, CuO/su ve su için olan % 57,6, % 57,1 ve % 55,8 ‘lik toplam verim 0,08 m/s hızına gelindiğinde %59,9, % 58,8 ve % 57,2 değerine ulaşmaktadır. 0,06 m/s akış hızından sonra verimlilik artışının yerini sabit bir değere bırakmasının, üç çalışma akışkanının da toplam veriminin bu akış hızından sonra sabitleşmesine neden olduğu görülmüştür. Eş. 6.11, Eş. 6.12 ve Eş. 6.13 farklı çalışma akışkanları için 0,08 m/s akış hızında meydana gelen toplam verimliliği hesaplamakta kullanılmıştır.

$$\eta_{\text{sistem,su}} = 0,1136+0,458=0,5716 \quad (6.14)$$

$$\eta_{\text{sistem,CuO/su}} = 0,1151+0,473=0,5881 \quad (6.15)$$

$$\eta_{\text{sistem,CuO+Fe/su}} = 0,1160+0,483=0,599 \quad (6.16)$$



Şekil 6.20. Toplam verimin farklı akış hızlarındaki değişimi

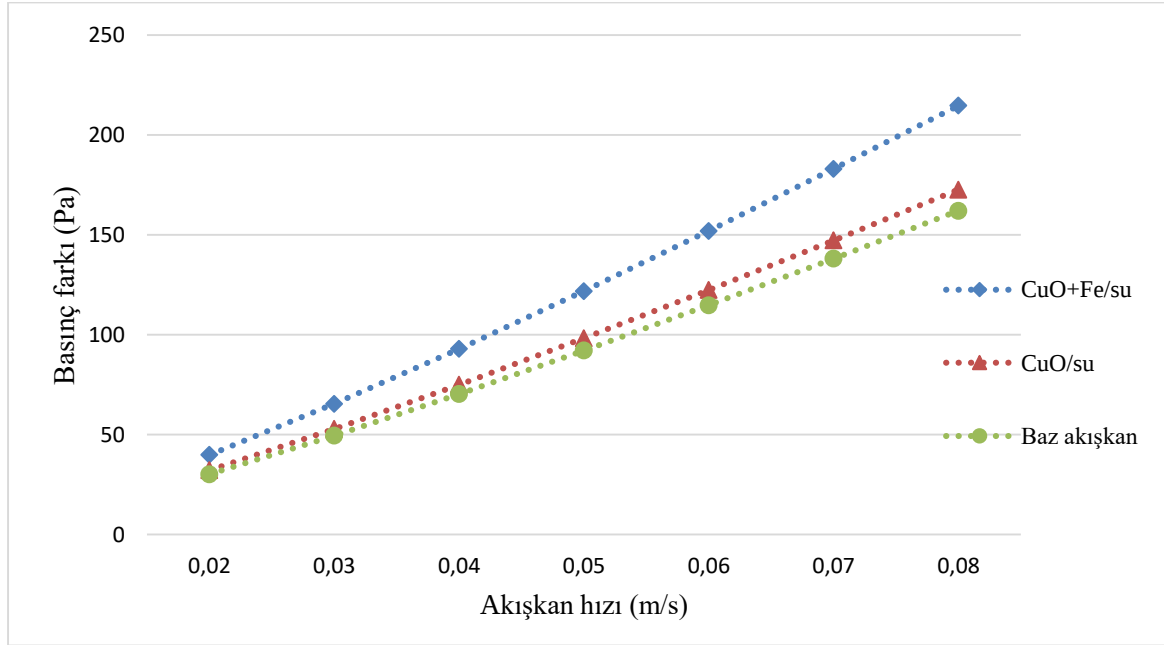
Şekil 6.20 ile gösterildiği gibi üç çalışma akışkanı içinde akışkan hızının artmasının, sistemin toplam verimliliğini büyük ölçüde değiştirmediği görülmektedir. CuO+Fe/su için akış hızının artması toplam verimliliği % 4 artırırken, CuO/su % 2,98 ve su ise % 2,5 artırmıştır. Sayısal analizi gerçekleştirilen fotovoltaiik termal sistemin toplam alanının 0,1155 m² olması solar hücreye uygulanan ısı akısının da sağladığı enerji miktarını ($Q=G.A_c$) azaltmaktadır. Daha düşük ısı akısında sisteme gelen toplam enerji miktarının daha az olmasıyla birlikte verimliliğin daha düşük olması bu çalışmada da daha küçük panel yüzey alanı nedeniyle gözlemlenmiştir.

6.5. Basınç Düşüşüne Etkisi

Boru içi akış analizleri için önemli bir parametre olan basınç düşüşü, akışın boru yüzeyine yakın bölgelerinde viskoz kuvvetlerin etkisiyle meydana gelmektedir. Akışa karşı gösterilen direnci temsil eden viskozite değerinin artması basınç kayıplarının da artmasına neden olmaktadır. Basınç düşüşü akışı devam ettirebilmek için gerekli olan pompa gücünü doğrudan etkilediği için nanoakışkanların yüksek ısıl performanslarının yanı sıra viskozitelerinin yüksek olması bir dezavantaj oluşturmaktadır. Boru içi akışlarda Eş. 6.17’te verilen eşitlik kullanılarak basınç düşümü hesaplanabilmektedir.

$$\Delta P = P_2 - P_1 = f \frac{L}{D_h} \rho \frac{u_{ort}^2}{2} \quad (6.17)$$

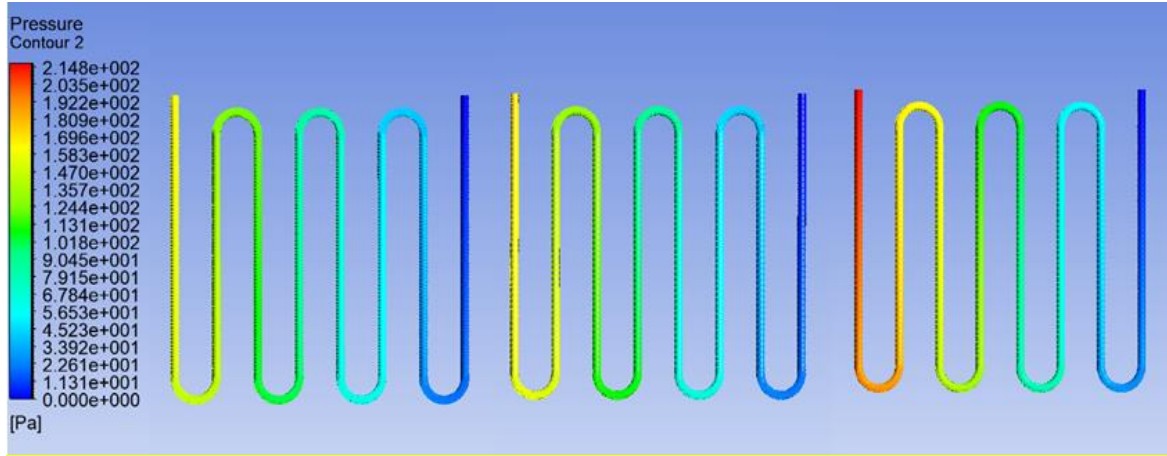
Bu denklemde f borunun pürüzlülük katsayısını, L borunun uzunluğunu (m), D_h hidrolik çapı (m), u_{ort} ise boru içindeki akışkanın ortalama hızını (m/s) göstermektedir. ANSYS Fluent yazılımında gerçekleştirilen analizlerde Report modülü basınç düşümünü sonuç çıktısı olarak verebilmektedir. Şekil 6.21 sayısal analiz aracılığıyla belirlenen üç çalışma akışkanı için basınç düşüşünün artan akış hızıyla değişimini göstermektedir.



Şekil 6.21. Basınç farkının farklı akış hızlarındaki değişimi

Şekil 6.21 ile gösterildiği gibi CuO+Fe/su akışkanının diğer akışkanlara kıyasla daha fazla basınç farkı oluşturduğu gözlemlenmektedir. Bu durum hibrit nanoakışkanın viskozite değerinin diğer akışkanlara göre daha yüksek olmasından dolayı sürtünme kayıplarının artmasının bir sonucudur. 0,02 m/s akış hızından 0,08 m/s akış hızına doğru gidildiğinde CuO+Fe/su'da basınç düşümü 39,92 Pa'dan 214,78 Pa değerine artarken CuO/su için 32,26-172,72 Pa ve su için ise 30,24-162,08 Pa değerine ulaşmıştır.

Şekil 6.22 0,08 m/s akış hızına sahip baz akışkan, CuO/su ve CuO+Fe/su çalışma akışkanı için meydana gelen basınç düşüşünü göstermektedir. Pressure outlet (basınç çıkışı) sınır şartı kullanıldığı için çalışma akışkanının atmosfer basıncı koşullarına çıktığı varsayılmaktadır. Bu durum Fluent yazılımında gösterge basıncı sıfır değerine eşitlenerek uygulanmıştır.



Şekil 6.22. 0,08 m/s akış hızı değeri için basınç düşüşü

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tekli nanoakışkanlardan sonra gelişmiş bir ısı transfer akışkanı olarak hibrit nanoakışkanların kullanımı hala araştırılması gereken bir alandır. Hibrit nanoakışkan davranışlarının daha iyi belirlenebilmesi için farklı çalışma alanlarında yapılmış daha fazla incelemeye ihtiyaç vardır. Bu tez kapsamında CuO/su nanoakışkanının içerisine Fe nanoparçacıkları eklenerek oluşturulan hibrit CuO+Fe/su nanoakışkanının, CuO/su ve baz akışkanın farklı akış hızı değerlerinde, fotovoltaiik termal sistemde kullanımı üzerine bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmada sabit 1000 W/m² ısı akısı kullanılırken nanoakışkanlar için %2 hacim konsantrasyonu seçilmiştir. Elde edilen veriler ile başlıca aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- ✓ Hibrit nanoakışkan, tekli nanoakışkan ve baz akışkana kıyasla ısı veriminde sırası ile % 2 ve % 5,4 iyileşme sağlamıştır.
- ✓ Artan akışkan hızı değeri üç çalışma akışkanı içinde ısı verimi artırır yönde etki sağlamıştır. Ancak 0,06 m/s akış hızından sonraki artış değeri giderek azalmış ve daha sabit bir değere ulaşılmıştır.
- ✓ Hibrit nanoakışkan, sağladığı performans artışının yanı sıra aynı zamanda basınç düşüşünde de artışa neden olmuştur.
- ✓ CuO+Fe/su hibrit nanoakışkan kullanımı elektriksel verimliliği baz akışkana kıyasla %2,14 artırırken, CuO/su tekli nanoakışkan kullanımı %1,32 oranında artırmıştır. Üç çalışma akışkanı içinde artan akış hızı elektriksel verimde belirgin bir fark oluşturmamıştır.
- ✓ Sayısal analiz yönteminin kullanılmasının zamandan ve oluşabilecek deneysel malzeme maliyetinden tasarruf sağladığı anlaşılmıştır.
- ✓ Kullanılan CFD simülasyonunda nanoakışkanlar için tek faz varsayımı yapılmıştır. İlerleyen çalışmalarda çift fazlı bir yaklaşım ile nanoakışkanların veriminde daha yüksek iyileşme oranı görülebilir.
- ✓ Literatür incelendiğinde tekli nanoakışkan özellikleri için kullanılan başlıca eşitlikler olmasına rağmen hibrit nanoakışkanlar için hem eşitlikler daha sınırlı hem de mevcut eşitlikler küçük hacim konsantrasyonları için daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu nedenle daha fazla deneysel çalışmanın yapılması ve deneysel verilerle uyumlu eşitliklerin türetilmesi nanoakışkan özelliklerini anlayabilmemiz için önemlidir.

- ✓ İncelenen hibrit nanoakışkanının hacim konsantrasyonu arttıkça maksimum ısıl iletkenlik katsayısı artışı %15,8 ile sınırlı kalırken, viskozitesindeki artış %38 olmuştur. Isı transferi için olumsuz etki oluşturan bu durum baz akışkana kıyasla daha iyi sonuçlar veren nanoparçacıklar ile ortadan kaldırılabilir.
- ✓ Çalışma akışkanı olarak konvansiyonel akışkan yerine nanoakışkan kullanımının ekonomik açıdan kapsamlı bir çalışması yapılarak sağladığı avantajlar daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Easterbrook, D. J. (2016). *Evidence-Based Climate Science*. Oxford: Elsevier, 163–173.
2. Wuebbles, D. J. and Jain, A. K. (2001). Concerns about climate change and the role of fossil fuel use. *Fuel Processing Technology*, 71, 99–119.
3. Pareto, V. E. and Pareto, M. P. (2009). The urban component of the energy crisis. *Urbanistica*, 51, 1-11.
4. Jia, Y., Alva, G. and Fang, G. (2019). Development and applications of photovoltaic–thermal systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102(2018), 249–265.
5. Khanjari, Y., Pourfayaz, F. and Kasaeian, A. B. (2016). Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system. *Energy Conversion and Management*, 122, 263–278.
6. Sardarabadi, M. and Passandideh-Fard, M. (2016). Experimental and numerical study of metal-oxides/water nanofluids as coolant in photovoltaic thermal systems (PVT). *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157, 533–542.
7. Minea, A. A. (2017). Hybrid nanofluids based on Al₂O₃, SiO₂ ve TiO₂ : Numerical evaluation of different approaches. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 852–860.
8. Sardarabadi, M., Passandideh-Fard, M. and Zeinali Heris, S. (2014). Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units). *Energy*, 66, 264–272.
9. Lelea, D., Calinoiu, D. G., Trif-Tordai, G., Cioabla, A. E., Laza, I. and Popescu, F. (2015). The hybrid nanofluid/microchannel cooling solution for concentrated photovoltaic cells. *AIP Conference Proceedings*, 1646(1), 122–128.
10. Younis, A., Onsa, M., Alhorr, Y. and Elsarrag, E. (2018). The Influence of Al₂O₃- ZnO- H₂O Nanofluid on the Thermodynamic Performance of Photovoltaic- Thermal Hybrid Solar Collector System. *Innovative Energy and Research*, 07(01), 1–8.
11. Verma, S. K., Tiwari, A. K., Tiwari, S., and Chauhan, D. S. (2018). Performance analysis of hybrid nanofluids in flat plate solar collector as an advanced working fluid. *Solar Energy*, 167(January), 231–241.
12. Rangababu, J. A., Kiran Kumar, K. and Srinivasa Rao, S. (2015). Numerical Analysis and validation of heat transfer mechanism of flat plate collectors. *Procedia Engineering*, 127, 63–70.
13. Bellos, E. and Tzivanidis, C. (2018). Thermal analysis of parabolic trough collector operating with mono and hybrid nanofluids. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 26(November), 105–115.

14. Mahato, N. (2018). Comparative Study of Solar Flat Plate Collector with Circular Tube using different Nano Fluids. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 6(1), 1784–1796.
15. Mirzaei, M. and Kim, K. C. (2019). Effects of a mixture of CuO and Al₂O₃ nanoparticles on the thermal efficiency of a flat plate solar collector at different mass flow rates. *Heat Transfer Research*, 50(10), 945–965.
16. Taherialekouhi, R., Rasouli, S., and Khosravi, A. (2019). An experimental study on stability and thermal conductivity of water-graphene oxide/aluminum oxide nanoparticles as a cooling hybrid nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 145, 118751.
17. Farajzadeh, E., Movahed, S. and Hosseini, R. (2018). Experimental and numerical investigations on the effect of Al₂O₃/TiO₂-H₂O nanofluids on thermal efficiency of the flat plate solar collector. *Renewable Energy*, 118, 122-130.
18. Gangadevi, R. and Vinayagam, B. K. (2019). Experimental determination of thermal conductivity and viscosity of different nanofluids and its effect on a hybrid solar collector. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(1), 199–209.
19. Chapin, D. M., Fuller, C. S. and Pearson, G. L. (1954). A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics*, 25(5), 676–677.
20. Javed, A. (2014). The Effect of Temperatures on the Silicon Solar Cell. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*, 9(3), 305–308.
21. Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering processes and systems*. Waltham: Academic Press, 166-174.
22. Al-Waeli, A. H. A., Sopian, K., Kazem, H. A. and Chaichan, M. T. (2017). Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems: Status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 109–130.
23. Al-Waeli, A. H. A., Kazem, H. A., Chaichan, M. T. and Sopian, K. (2019). *PV/T principles and design*. Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems: Principles, Design, and Application, Springer Nature Switzerland AG, 65–74.
24. Ammar, A. A., Sopian, K., Alghoul, M. A., Elhub, B. and Elbreki, A. M. (2019). Performance study on photovoltaic/thermal solar-assisted heat pump system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(1), 79–87.
25. Das, S. K., Choi, S. U. S. and Patel H. E. (2006). Heat transfer in nanofluids- A review. *Heat Transfer Engineering*, 27(10), 3–19.
26. Sachit, F. A., Rosli, M. A. M., Tamaldin, N., Misha, S. and Abdullah, A. L. (2018). Nanofluids used in photovoltaic thermal (PV/T) systems: A review. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(3.20), 599–611.

27. Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K. and Hishinuma, N. (1993). Alteration of Thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. *Netsu Bussei*, 7(4), 227–233.
28. Choi, S. U. S. and Eastman, J. A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication)*, 231(March), 99–105.
29. Singh, J. and Rawat, M. (2016). A brief review on synthesis and characterization of copper oxide nanoparticles and its applications. *Journal of Bioelectronics and Nanotechnology*, 1(1), 1-9.
30. Xuan, Y. and Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(1), 58–64.
31. Gakare, A. (2019). A review on nanofluids : Preparation and applications. *Nano Trends: A Journal of Nanotechnology and Its Applications*, 21(1), 21–35.
32. Ahmed, A., Baig, H., Sundaram, S. and Mallick, T. K. (2019). Use of nanofluids in solar PV/Thermal systems. *International Journal of Photoenergy*, 2019(June), 1–17.
33. Ealias, A. M. and Saravanakumar, M. P. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(3), 1-15.
34. Zaytseva, O. and Neumann, G. (2016). Carbon nanomaterials: Production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 3(1), 1-26.
35. Tyagi, S. (2016). *Pharmaceutics and Nanotechnology Nanoparticles – An Overview of Classification and Applications*, 4, 102–108.
36. Erem, A. D. and Özcan, G. (2013). Polimer esaslı nanokompozitler ve tekstil uygulamaları. *Tekstil ve Muhendis*, 20(89), 36–47.
37. Wang, X. and Mujumdar, A. S. (2007). Heat transfer characteristics of nanofluids : A review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 1–19.
38. Nagarajan, P. K., Subramani, J., Suyambazhahan, S. and Sathyamurthy, R. (2014). Nanofluids for solar collector applications: A Review. *Energy Procedia*, 61, 2416–2434.
39. Chen, H., Ding, Y., He, Y. and Tan, C. (2007). Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids. *Chemical Physics Letters*, 444, 333–337.
40. Fedele, L., Colla, L. and Bobbo, S. (2012). Viscosity and thermal conductivity measurements of water-based nanofluids containing titanium oxide nanoparticles. *International Journal of Refrigeration*, 35(5), 1359–1366.
41. Babar, H. and Ali, H. M. (2019). Towards hybrid nanofluids: Preparation, thermophysical properties, applications, and challenges. *Journal of Molecular Liquids*, 281, 598–633.

42. Mishra, P. C., Mukherjee, S., Nayak, S. K. and Panda, A. (2014). A brief review on viscosity of nanofluids. *International Nano Letters*, 4(4), 109–120.
43. Nguyen, C. T., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, S. and Angue Mintsa, H. (2007). Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids - Hysteresis phenomenon. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(6), 1492–1506.
44. Namburu, P. K., Kulkarni, D. P., Dandekar, A. and Das, D. K. (2007). Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids. *Micro and Nano Letters*, 2(3), 67–71.
45. Einstein, A. (1906). A new determination of molecular dimensions. *Annalen der Physik*, 4(19), 289–306.
46. Jama, M., Singh, T., Gamaleldin, S. M., Koc, M., Samara, A., Isaifan, R. J. and Atieh, M. A. (2016). Critical review on nanofluids: Preparation, characterization, and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2016, 1–22.
47. Brickman, H. (1952). The viscosity of concentrated suspensions in solutions. *Journal Chemistry Physics*, 20, 571.
48. Esfe, M. H., Arani, A. A. A., Rezaie, M., Yan, W. and Karimipour, A. (2015). Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag – MgO / water hybrid nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 66, 189–195.
49. Maxwell, J. C. (1873). *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford: Clarendon Press, 333–335.
50. Hamilton, R. L. and Crosser, O. K. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *I and EC Fundamentals*, 1(3), 187–191.
51. Kumar, P. M., Kumar, J. and Tamilarasan, R. (2015). Review on nanofluids theoretical thermal conductivity models. *Engineering Journal*, 19(1), 67–84.
52. Sheikholeslami, M. and Ganji, D. D. (2015). Nanofluid flow and heat transfer between parallel plates considering Brownian motion using DTM. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 283, 651–653.
53. Vajjha, R. S., Das, D. K. and Mahagaonkar, B. M. (2009). Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory. *Petroleum Science and Technology*, 27(6), 612–624.
54. Said, Z. and Saidur, R. (2017). *Nanofluid Heat and Mass Transfer in Engineering Problems: Thermophysical Properties of Metal Oxides Nanofluids*, Rijeka: Intech, 39–63.
55. Pak, B. C. and Cho, Y. I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental- Heat Transfer*, 11, 151–170.

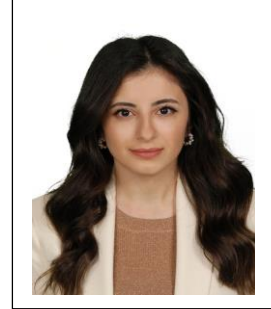
56. Takabi, B. and Salehi, S. (2014). Augmentation of the heat transfer performance of a sinusoidal corrugated enclosure by employing hybrid nanofluid. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 1-16.
57. Shahrul, I. M., Mahbubul, I. M., Khaleduzzaman, S. S., Saidur, R. and Sabri, M. F. M. (2014). A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 88–98.
58. Xuan, Y. and Roetzel, W. (2000). Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 3701–3707.
59. Sheikholeslami, M. and Ganji, D. D. (2016). *Applications of Nanofluid for Heat Transfer Enhancement: Nanofluid: Definition and applications*. New York:William Andrew, 1–52.
60. Ilyas, S. U., Pendyala, R. and Marmeni, N. (2014). Preparation, sedimentation, and agglomeration of nanofluids. *Chemical Engineering and Technology*, 37(12), 2011–2021.
61. Yang, L. and Hu, Y. (2017). Toward TiO₂ nanofluids part 1 : Preparation and properties. *Nanoscale Research Letters*, 12, 1–21.
62. Mohammed, H. A., Al-aswadi, A. A., Shuaib, N. H. and Saidur, R. (2011). Convective heat transfer and fluid flow study over a step using nanofluids : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2921–2939.
63. Nagar, H. (2017). A review on nanofluids : Properties and applications. *International Journal Of Advance Research And Innovative Ideas In Education*, 3(3), 3185-3209.
64. Patankar, S. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow: Computational methods in mechanics and thermal science*. Washington, DC: Hemisphere Publication Corporation, 1–197.
65. ANSYS, Inc. (2013). *Meshing User's Guide*, USA: SAS IP, Inc, 127-141.
66. Çengel, Y. A. and Cimbala, J. M. (2008). *Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları* (çev. T. Engin, H. R. Öz, H. Küçük ve Ş. Çeşmeci). İzmir: Güven Bilimsel Yayınevi, 818-830.
67. Khelifa, A., Touafek, K., Moussa, H. Ben and Tabet, I. (2016). Modeling and detailed study of hybrid photovoltaic thermal (PV / T) solar collector. *Solar Energy*, 135, 169–176.
68. Nasrin, R., Rahim, N. A., Fayaz, H. and Hasanuzzaman, M. (2018). Water/MWCNT nanofluid based cooling system of PVT: Experimental and numerical research. *Renewable Energy*, 121, 286–300.
69. Chaudhari, M. S., Nalawade, D. B. and Jagadale, M. (2011). Heat Transfer Enhancement of Solar Flat Plate Collector by Using V Corrugated Fins and Various Parameters. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 5(5), 119–123.

70. Yandri, E. (2019). Methods for the development and testing of polymeric hybrid photovoltaic thermal (PVT) collector for indoor experiments. *MethodsX*, 6(July), 2620–2635.
71. Al-baali, G. and Farid, M. M. (2006). *Sterilization of food in retort pouches: Fundamentals of Computational Fluid*. New York: Springer Science+Business Media, 33–44.
72. Martin, K., Sözen, A., Çiftçi, E. and Ali, H. M. (2020). An experimental investigation on aqueous Fe–CuO hybrid nanofluid usage in a plain heat pipe. *International Journal of Thermophysics*, 41(9), 1–21.
73. Chow, T. T. (2003). Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, 75(2), 143–152.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARAASLAN, İrem
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 09.03.1996, Kırıkkale
Medeni hali : Bekar
e-mail : iremkaraaslan@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği	2018
Lise	Çağrıbey Anadolu Lisesi	2014

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2019-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Karaaslan, İ. ve Menlik, T. (2020, Aralık). *Hibrit nanoakışkan kullanımının fotovoltaiik panel performansı üzerine etkisi*, 1st International Science And Innovation Congress, Ankara, Türkiye.

Hobiler

Tiyatro, müze gezmek, badminton.



GAZİ GELECEKTİR...