



**PARABOLİK OLUK TİPİ GÜNEŞ
KOLEKTÖRLERİNDE NANOAKIŞKAN
KULLANIMININ ISIL PERFORMANSA ETKİSİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ**

Recep EKİCİLER

**2022
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Kamil ARSLAN**

**PARABOLİK OLUK TİPİ GÜNEŞ KOLEKTÖRLERİNDE NANOAKIŞKAN
KULLANIMININ ISIL PERFORMANSA ETKİSİNİN DENEYSEL VE
SAYISAL İNCELENMESİ**

Recep EKİCİLER

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Kamil ARSLAN**

**KARABÜK
Şubat 2022**

Recep EKİCİLER tarafından hazırlanan “ PARABOLİK OLUK TİPİ GÜNEŞ KOLEKTÖRLERİNDE NANOAKIŞKAN KULLANIMININ ISIL PERFORMANSA ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Kamil ARSLAN
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Oğuz TURGUT
2. Tez Danışmanı, Gazi Üniversitesi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 24/02/2022

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Hüseyin KURT (NEÜ)
Üye : Prof. Dr. Kamil ARSLAN (KBÜ)
Üye : Prof. Dr. Oğuz TURGUT (GÜ)
Üye : Prof. Dr. Mehmet ÖZALP (KBÜ)
Üye : Doç. Dr. Engin GEDİK (KBÜ)
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin KAYA (BÜ)
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mutlu TEKİR (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Recep EKİCİLER

ÖZET

Doktora Tezi

PARABOLİK OLUK TİPİ GÜNEŞ KOLEKTÖRLERİNDE NANOAKIŞKAN KULLANIMININ ISIL PERFORMANSA ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

Recep EKİCİLER

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Prof. Dr. Kamil ARSLAN

Prof. Dr. Oğuz TURGUT

Şubat 2022, 176 sayfa

Bu çalışmada, parabolik oluk tipi güneş kolektöründeki nanoakışkan akışının ısı ve akış karakteristikleri farklı hacimsel debilerde (20 lt/sa, 40 lt/sa, 60 lt/sa, 80 lt/sa) ve nanopartikül hacimsel oranlarında (%1, %2, %3, %4) deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deney sonuçları ışığında faydalı enerji, kolektör verimi, soğurulan ve atılan enerji parametresi, kolektör giriş-çıkış sıcaklık farkları, kaybolan enerji gibi değişimlerin kolektöre etkisi incelenmiştir. Sayısal çalışmada ise, deneysel çalışmada kullanılan akışkanlara (EG-H₂O ve ZnO/EG-H₂O) ilave olarak yeni nesil hibrit nanoakışkanlar ile sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, üç farklı tip hibrit nanoakışkan (Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O ve Ag-MgO/EG-H₂O) kullanılmıştır. Ayrıca, kolektör performansını arttırmak amacıyla kolektör soğurucusuna akış yönünde iki adet kanatçık eklenerek, kanatçığın kolektör verimi

üzerine etkisi incelenmiştir. Sayısal çalışmada gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek için SOLTRACE paket programı kullanılarak Monte Carlo Işın İzleme Metodu (MCRT) ile kolektör soğurucusu üzerinde homojen olmayan ısı akısı dağılımı oluşturulmuştur. Nusselt sayısı, sürtünme faktörü, PEC sayısı, entropi üretimi ve Bejan sayısı bu kapsamda incelenen parametrelerdir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre, ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının ısı transfer ve akış karakteristikleri bakımından baz akışkana (EG-H₂O) göre üstünlük sağladığı tespit edilmiştir. Hacimsel debinin ve nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte kolektörün ısı transferi performansının da arttığı saptanmıştır. Ayrıca, kolektör veriminin artan hacimsel debi ve nanopartikül hacimsel oranı ile birlikte yaklaşık %30'a kadar arttığı saptanmıştır. Sayısal analiz sonuçlarında ise, hibrit nanopartiküllü nanoakışkanların tek nanopartiküllü nanoakışkana oranla kolektör içerisindeki taşınım ile ısı transferini daha fazla arttırdığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında hibrit nanoakışkanların entropi üretiminin de tek nanoapartiküllü nanoakışkana göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kolektörün ısı transfer performansının soğurucuya kanatçık eklenmesiyle birlikte çok daha yüksek seviyelere ulaştığı elde edilmiştir. Çalışma akışkanı olarak Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanının kullanıldığı durumda kanatçıklı soğurucu boru içerisindeki Nusselt sayısının kanatçıksız duruma göre %24'e, sürtünme katsayısının %19'a ve PEC sayısının ise %12'ye varan oranlarda daha yüksek çıktığı saptanmıştır. Kanatçıklı soğurucu boruya sahip olan kolektörde entropi üretiminin kanatçıksız duruma göre daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Kanatçıklı soğurucu boru geometrisine sahip kolektör içerisindeki %4 nanopartikül hacimsel oranlı Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanının 80 lt/sa debi değerindeki akış şartı parabolik oluk tipi güneş kolektöründe en yüksek ısı performansını elde edilmesini sağlamıştır.

Anahtar Sözcükler : Parabolik oluk tipi güneş kolektörü, güneş kolektörü, Bejan sayısı, kolektör verimi, entropi üretimi.

Bilim Kodu : 91441

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NANOFLUID USAGE ON THERMAL PERFORMANCE IN PARABOLIC TROUGH TYPE SOLAR COLLECTORS

Recep EKİCİLER

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisors:

Prof. Dr. Kamil ARSLAN

Prof. Dr. Oğuz TURGUT

February 2022, 176 pages

In this study, experimental and numerical heat and flow characteristics of nanofluid flow in a parabolic trough solar collector were investigated at different volumetric flow rates (20 lt/h, 40 lt/h, 60 lt/h, 80 lt/h) and nanoparticle volume fractions (1%, 2%, 3%, 4%) were experimentally and numerically examined. In the light of the experimental results, the effects of changes such as useful energy, collector efficiency, absorbed and discarded energy parameter, collector inlet-output temperature differences, and lost energy on the collector were investigated. In the numerical study, in addition to the fluids (EG-H₂O and ZnO/EG-H₂O) used in the experimental study, numerical solutions with new generation hybrid nanofluids has been carried out. In this context, three different types of hybrid nanofluids (Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O and Ag-MgO/EG-H₂O) were used. In addition, in order to increase the collector

performance, two fins were added to the collector absorber in the flow direction and the effect of the fin on the collector efficiency was investigated. In order to obtain realistic data in the numerical study, nonuniform heat flux distribution on the collector absorber was created with the Monte Carlo Ray Tracing Method (MCRT) using the SOLTRACE package program. Nusselt number, friction factor, PEC number, entropy generation and Bejan number were the parameters examined in this context. According to the experimental study results, it was determined that the ZnO/EG-H₂O nanofluid is superior to the base fluid (EG-H₂O) in terms of heat transfer and flow properties. It was noticed that the heat transfer performance of the collector increases with the increase in the volumetric flow rate and the nanoparticle volume fraction. In addition, it was determined that the collector efficiency increased up to about 30% with increasing volumetric flow and nanoparticle volumetric ratio. In the numerical analysis results, it was observed that the hybrid nanoparticle nanofluids increased the convection heat transfer in the collector more than the single nanoparticle nanofluid. In addition, it has been observed that the entropy generation of hybrid nanofluids is lower than that of single nanoparticle nanofluid. It has been obtained that the heat transfer performance of the collector reaches much higher levels with the addition of fins to the absorber. With the volumetric flow of 80 lt/h and the use of Ag-MgO/EG-H₂O hybrid nanofluid, the Nusselt number with fins is 24% higher, the friction coefficient is 19%, and the PEC number is up to 12% higher than the case without fins. It has been observed that the entropy generation in the collector with the finned absorber tube is higher than the case without fins. The use of Ag-MgO/EG-H₂O hybrid nanofluid provided the best performance in the parabolic trough type solar collector, provided that the volumetric flow rate was 80 lt/h and the nanoparticle volumetric ratio was 4% with the addition of fin to the absorber.

Key Word : Parabolic trough solar collector, solar collector, Bejan number, collector efficiency, entropy generation.

Science Code : 91441

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocalarım Prof. Dr. Kamil ARSLAN'a ve Prof. Dr. Oğuz TURGUT'a bilgi, beceri ve tecrübeleri yanında insanlığı ile bu zorlu süreçte çok önemli değerler kazanmamı sağladıkları ve örnek bir danışman olmaları nedeniyle minnettarlığımı saygılarımla sunarım. Tez izleme komitesindeki Prof. Dr. Mehmet ÖZALP'a ve Doç. Dr. Engin GEDİK'e ve tez jürisinde olan Prof. Dr. Hüseyin KURT'a, Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin KAYA'ya ve Dr. Öğr. Üyesi Mutlu TEKİR'e tecrübeleri ve bilgi birikimleriyle gösterdikleri yardım ve yönlendirmeleri için teşekkürlerimi borç bilirim.

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan annem Sevim EKİCİLER'e ve babam Emin EKİCİLER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Deney sisteminin kurulmasında ve verilerin ölçümünde beni değerli bilgileriyle yönlendiren Elektronik Mühendisi Aydın YILMAZ'a yürekten teşekkür ederim. Tezimi hazırlarken bana her türlü sabrı gösteren, sevgisi ve anlayışıyla, hayatımın her noktasındaki desteğiyle yolumu aydınlatan eşim Ayşegül EKİCİLER'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

Son olarak, bu tez çalışması TÜBİTAK-BİDEB 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı ve Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: FDK-2020-2277). Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a ve Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİ.....	2
1.1.1. Düz Plakalı Kolektörler	2
1.1.2. Vakum Tüplü Güneş Kolektörleri.....	2
1.1.3. Yoğunlaştırıcı Güneş Kolektörleri.....	3
1.2. TÜRKİYE’DE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ	4
BÖLÜM 2	6
GÜNEŞ İŞİNİMİ	6
2.1. GÜNEŞ-DÜNYA GEOMETRİK İLİŞKİSİ	6
2.2. GÜNEŞ-DÜNYA AÇILARI.....	7
2.2.1. Saat Açısı (ω)	7
2.2.2. Enlem Açısı (ϕ)	9
2.2.3. Güneş Eğim Açısı (δ)	9
2.2.4. Zenit Açısı (θ_z).....	10
2.2.5. Güneş İrtifa Açısı (α).....	10
2.2.6. Güneş Azimut Açısı (γ).....	11
2.2.7. Geliş Açısı (θ)	11

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3	12
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	12
3.1. PARABOLİK OLUK TİPİ GÜNEŞ KOLEKTÖRLERİNDE ISI TRANSFER AKIŞKANI ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI	12
3.2. POTGÜK ÜZERİNDE ISI TRANSFER PERFORMANS ARTTIRMA ÇALIŞMALARI.....	13
3.2.1. Nanoakışkan Kullanımı	14
3.2.2. Hibrit Nanoakışkan Kullanımı.....	19
3.2.3. POTGÜK Soğurucu Borusu Üzerinde Yapılan Değişikler	21
3.3. ÇALIŞMANIN AMACI	22
BÖLÜM 4	24
POTGÜK TASARIMI VE ISIL ANALİZİ	24
4.1. POTGÜK GEOMETRİSİ VE PARAMETRELERİ	24
4.2. ISIL ANALİZ.....	29
BÖLÜM 5	36
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	36
5.1. DENEY DÜZENİĞİ	36
5.1.1. POTGÜK Alıcısı	37
5.1.2. Parabolik Yansıtıcı Yüzey	38
5.1.3. Pompa	38
5.1.4. Isı Değiştirici	39
5.1.5. Sıcaklık Ölçümü	39
5.1.6. Veri Kaydedici.....	40
5.1.7. Güneş Işınımı Ölçümü.....	41
5.1.8. Rotametre.....	42
5.1.9. Isı Transfer Akışkanı Deposu	42
5.2. NANOAKIŞKAN	43
5.2.1. Nanoakışkan Termofiziksel Özelliklerinin Bulunması	43
5.2.2. Nanoakışkan Hazırlanması	44
5.2.3. Yüzey Aktif Maddesi.....	45

	<u>Sayfa</u>
5.2.4. ZnO/EG-H ₂ O Nanoakışkanının Üretimi	46
5.3. DENEYSEL PROSEDÜR	48
5.4. DENEYSEL HESAPLAMA	49
5.5. BELİRSİZLİK ANALİZİ	50
BÖLÜM 6	52
SAYISAL ÇALIŞMA	52
6.1. FİZİKSEL MODEL	53
6.2. TEMEL DENKLEMLER	54
6.3. SINIR ŞARTLARI	55
6.3.1. Monte Carlo Işın İzleme Metodu (MCRT) ve Isı Akısı Sınır Şartı ...	55
6.3.2. Diğer Sınır Şartları	58
6.4. HİBRİT NANOAKIŞKANLARIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BULUNMASI	58
6.5. SAYISAL ÇÖZÜMLEME	60
6.6. SAYISAL HESAPLAMALARDA KULLANILAN EŞİTLİKLER	62
BÖLÜM 7	65
BULGULAR VE TARTIŞMA	65
7.1. DENEYSEL BULGULAR	65
7.1.1. Kolektör Verimi ve Güneş Işınım Şiddetinin Zamanla Değişimi	65
7.1.2. Sıcaklıkların ve Rüzgâr Hızının Zamanla Değişimi	68
7.1.3. POTGÜK'e Ait Ortalama Faydalı Enerji ve Verimin Karşılaştırılması.	71
7.1.4. POTGÜK'e Ait Optik Verim	72
7.1.5. Faydalı Enerjinin (\dot{Q}_k) Güneş Işınım Şiddeti ile Değişimi	73
7.1.6. Kolektör Veriminin İndirgenmiş Sıcaklık Parametresi ile Değişimi	75
7.1.7. Soğurulan Enerji Parametresinin Nanopartikül Hacimsel Oranı ile Değişimi	79
7.1.8. Atılan Enerji Parametresinin Nanopartikül Hacimsel Oranı ile Değişimi	80
7.1.9. Sıcaklık Farkı ve Kolektör Veriminin Farklı Akışkanlar için Değişimi	82
7.1.10. Kaybolan Enerjinin Nanopartikül Hacimsel Oranı ile Değişimi	85

	<u>Sayfa</u>
7.2. SAYISAL BULGULAR	86
7.2.1. Sayısal Olarak Bulunan Kolektör Veriminin Doğrulanması.....	87
7.2.2. Kanatçksız Soğurucuda Nanoakışkan ve Hibrit Nanoakışkanların Isı ve Akış Karakteristiklerine Etkisi.....	88
7.2.3. Kanatçıklı Soğurucuda Nanoakışkan ve Hibrit Nanoakışkanların Isı ve Akış Karakteristiklerine Etkisi.....	107
7.2.4. Soğurucuya Kanatçık Eklenmesinin Isı ve Akış Karakteristiklerine Etkisinin Ag-MgO/EG-H ₂ O Hibrit Nanoakışkanı Kullanımı ile İncelenmesi	124
BÖLÜM 8	131
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	131
KAYNAKLAR	135
EK AÇIKLAMALAR A.....	148
BELİRSİZLİK ANALİZİ ÖRNEK HESAPLAMA.....	148
EK AÇIKLAMALAR B.....	150
DENEY SONUÇLARI.....	150
EK AÇIKLAMALAR C.....	167
ÖRNEK HESAPLAMALAR	167
ÖZGEÇMİŞ	176

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Düz plakalı güneş kolektörü [6]	2
Şekil 1.2.	Vakum tüplü güneş kolektörünü oluşturan vakum tüpünün kısımları [12]	3
Şekil 1.3.	Yoğunlaştırıcılı güneş enerji sistemleri (a) Oluk tipi, (b) Çanak tipi, (c) Kule tipi [15]	4
Şekil 1.4.	Avrupa'nın güneş ışınımını gösteren harita [16].....	5
Şekil 1.5.	Türkiye'nin güneşlenme haritası [17]	5
Şekil 2.1.	Dünya'nın Güneş etrafındaki hareketi [21].....	7
Şekil 2.2.	Saat açısı gösterimi [24]	8
Şekil 2.3.	Enlem açısının gösterimi [24]	9
Şekil 2.4.	Zenit, azimut ve güneş irtifa açıları gösterimi [24]	10
Şekil 4.1.	Üç boyutlu POTGÜK parametreleri ve elemanları	24
Şekil 4.2.	Parabol parametreleri	25
Şekil 4.3.	POTGÜK üzerindeki parametrelerin gösterimi	27
Şekil 4.4.	Alıcının kısımları.....	28
Şekil 4.5.	Alıcıya ait bir boyutlu enerji dengesi [91].....	30
Şekil 5.1.	Deney düzeneği genel görünümü	37
Şekil 5.2.	DeneySEL çalışmalarında kullanılan pompa	38
Şekil 5.3.	Isı değiştiricinin genel görünümü.....	39
Şekil 5.4.	DeneySEL çalışmalarında kullanılan veri kaydedicinin görünümü.....	40
Şekil 5.5.	Pironometre	41
Şekil 5.6.	Rotametre	42
Şekil 5.7.	Isı transfer akışkanı deposu	42
Şekil 5.8.	ZnO nanopartiküllerine ait (a) SEM ve (b) XRD görüntüsü.....	47
Şekil 5.9.	Farklı nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO/EG-H ₂ O nanoakışkanı numuneleri.....	47
Şekil 5.10.	Deneye ait şematik gösterim	49
Şekil 6.1.	Modellenen (a) kanatçıksız alıcı görünüşü (b) kanatçıklı alıcının izometrik görünüşü (c) kanatçıklı alıcının önden görünüşü.....	53
Şekil 6.2.	SOLTRACE programında modellenen soğurucuya ait ısı akışı dağılımı.....	56

Şekil 6.3.	(a) Isı akısı değişimi (b) soğurucunun üzerinde oluşan ısı akısı dağılımının Fluent'teki görünümü.....	57
Şekil 6.4.	Çözüm alanı ağ yapısı	61
Şekil 7.1.	Kolektör veriminin ve güneş ışınım şiddetinin farklı günlerde ve hacimsel debilerde değişimi	66
Şekil 7.2.	Sıcaklık ve rüzgar hızının farklı günlerde ve hacimsel debilerde değişimi	69
Şekil 7.3.	POTGÜK'e ait optik verimin geliş açısı ile değişimi	73
Şekil 7.4.	(a) Faydalı enerjinin farklı hacimsel debilerde EG-H ₂ O ve %4 ZnO/EG-H ₂ O akışkanları için değişimi, (b) faydalı enerjinin ZnO/EG-H ₂ O nanoakışkanı için farklı nanopartikül hacimsel oranları ile değişimi	74
Şekil 7.5.	Kolektör veriminin indirgenmiş sıcaklık parametresi ile değişimi (a) 20 lt/sa, (b) 40 lt/sa, (c) 60 lt/sa, (d) 80 lt/sa	77
Şekil 7.6.	Soğurulan enerji parametresinin nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi	79
Şekil 7.7.	Atılan enerji parametresinin nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi	80
Şekil 7.8.	Sıcaklık farkı ve kolektör veriminin farklı akışkanlar için değişimi (a) 20 lt/sa, (b) 40 lt/sa, (c) 60 lt/sa, (d) 80 lt/sa	83
Şekil 7.9.	Kaybolan enerjinin nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi.....	86
Şekil 7.10.	Anlık verim ve güneş ışınım şiddetinin deneysel, analitik ve sayısal çalışma sonuçlarının kıyaslanması	87
Şekil 7.11.	Nusselt sayısının literatürdeki teorik korelasyonla [128] kıyaslanması	88
Şekil 7.12.	Nusselt sayısının farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.....	89
Şekil 7.13.	Sürtünme faktörünün farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.....	92
Şekil 7.14.	PEC sayısının farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.....	95
Şekil 7.15.	Isı transferinden kaynaklanan entropi üretiminin farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi	97
Şekil 7.16.	Sürtünmeden kaynaklanan entropi üretiminin farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi	100
Şekil 7.17.	Toplam entropi üretiminin farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.....	102
Şekil 7.18.	Bejan sayısının farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.....	105

Sayfa

Şekil 7.19.	Kanatçıklı soğurucuda Nusselt sayısının farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi	107
Şekil 7.20.	Kanatçıklı soğurucuda sürtünme faktörünün farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi	110
Şekil 7.21.	Kanatçıklı soğurucuda PEC sayısının farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi	112
Şekil 7.22.	Kanatçıklı soğurucuda ısı transferinden kaynaklanan entropi üretiminin farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi	115
Şekil 7.23.	Kanatçıklı soğurucuda sürtünmeden kaynaklanan entropi üretiminin farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi	117
Şekil 7.24.	Kanatçıklı soğurucuda toplam entropi üretiminin farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi	120
Şekil 7.25.	Kanatçıklı soğurucuda Bejan sayısının farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi	122
Şekil 7.26.	Soğurucunun kanatçıklı ve kanatçıksız durumlarında Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi	125
Şekil 7.27.	Soğurucunun kanatçıklı ve kanatçıksız durumlarında PEC sayısının nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi.....	126
Şekil 7.28.	Soğurucunun kanatçıklı ve kanatçıksız durumlarında (a) ısı transferinden kaynaklanan, (b) sürtünmeden kaynaklanan, (c) toplam entropi üretiminin nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi.....	127
Şekil 7.29.	Soğurucunun kanatçıklı ve kanatçıksız durumlarında Bejan sayısının nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi.....	129
Şekil 7.30.	Soğurucunun kanatçıklı ve kanatçıksız durumlarında kolektör veriminin nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi	130

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. POTGÜK'e ait geometrik parametreler	28
Çizelge 5.1. Pyreks malzemesinin termofiziksel ve optik özellikleri [92]	38
Çizelge 5.2. J tipi ısı çift özellikleri.....	40
Çizelge 5.3. Pironometre teknik özellikleri	41
Çizelge 5.4. EG-H ₂ O ve ZnO termofiziksel özellikleri [97] ve hesaplanan nanoakışkan özellikleri.....	43
Çizelge 6.1. Sayısal çalışma parametreleri.....	52
Çizelge 6.2. Nanopartiküllerin özellikleri [71,127].....	60
Çizelge 6.3. EG-H ₂ O akışkanının 80 lt/sa hacimsel debideki Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün ağ sayısı ile değişimi	62
Çizelge 7.1. Farklı eşitliklerle faydalı enerji ve verimin karşılaştırılması.....	71
Çizelge 7.2. F _R ve U _L 'nin farklı hacimsel debilerdeki ve akışkanlardaki değerleri.....	81
Çizelge 7.3. F _R ve U _L 'nin farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki değerleri	82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

A_c	: kolektör toplam açıklık alanı (m^2)
A_r	: soğurucu boru alanı (m^2)
Be	: Bejan sayısı
C	: kolektör yoğunlaştırma oranı
c_p	: özgül ısı (J/kgK)
$d_{cdış}$: cam zarf dışı (m)
$d_{dış}$: soğurucu boru dışı çapı (m)
$d_{iç}$: soğurucu boru iç çapı (m)
F_R	: ısı alma faktörü
f	: sürtünme faktörü
\dot{G}_T	: güneş ışınım şiddeti (W/m^2)
h	: ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
k	: ısı iletkenlik katsayısı (W/mK)
L	: kolektör boyu (m)
L_t	: ısı giriş uzunluğu (m)
\dot{m}	: kütleli debi (kg/s)
n	: gün sayısı
Nu	: Nusselt sayısı
P	: Basınç (Pa)
Pr	: Prandtl sayısı
\dot{Q}_k	: faydalı enerji (W)
r_m	: yansıtıcı yüzey yarıçapı (m)
Re	: Reynolds sayısı
\dot{S}_{gen}	: entropi üretimi (W/K)
T	: sıcaklık ($^{\circ}C$)

U_L : toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
 W : kolektör genişliği (m)
 V : hız (m/s)
 x, y, z : kartezyen koordinatlar

Alt İndis

a : soğurucu boru
 b : ortalama
 c : cam zarf
 $\ç$: çıkış
 $\çev$: çevre
 eff : efektif
 f : akışkan
 g : giriş
 hnp : hibrit nanopartikül
 kr : kritik
 np : nanopartikül
 $p1$: birinci nanopartikül
 $p2$: ikinci nanopartikül
 w : rüzgar

Yunan Harfleri

η_{isil} : anlık kolektör verimi
 θ_z : zenit açısı ($^\circ$)
 ϕ_r : kolektör kenar açısı ($^\circ$)
 γ : güneş azimuth açısı ($^\circ$), kesişme faktörü
 α : soğuruculuk katsayısı
 δ : güneş eğim açısı ($^\circ$)
 ε : ışınım yayma katsayısı
 μ : dinamik vizkosite (Pa s)
 σ : Stefan-Boltzman sabiti ($Wm^{-2}K^{-4}$)

- τ : ışınım geçirgenliği
 ω : saat açısı (°)
 ϕ : nanopartikül hacimsel oranı (%)
 \emptyset : enlem açısı (°)

KISALTMALAR

EG-H ₂ O	: Etilen Glikol-Su Baz Akışkanı
GYS	: Güneş Yerel Saati
ITA	: Isı Transfer Akışkanı
PEC	: Performans Değerlendirme Kriteri
POTGÜK	: Parabolik Oluk Tipi Güneş Kolektörü
PVP	: Polivinilpirolidon
RSM:	: Root-Sum-Square Method (Kök-Toplam-Kare Metodu)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son zamanlarda nüfus artışıyla birlikte enerji tüketimi önemli ölçüde artmıştır. Bu enerji tüketiminin büyük çoğunluğunu fosil yakıtlar oluşturmaktadır. Fosil yakıtların kullanılmasıyla birlikte çevreye olan zararı ve fosil yakıt kaynaklarının azalma eğiliminde olduğu ortaya çıkmıştır. Fosil yakıtların kullanılmasıyla ortaya çıkan en önemli sorun hava kirliliğidir ve insan sağlığı için çok tehlikelidir. Bu sorunu çözmek için bilim insanları “Fosil yakıt kullanmadan nasıl enerji üretebiliriz?” sorusunun cevabı için çalışmalar yapmaktadırlar. Şu an için çalışmalar yeşil enerji teknolojileri üzerine yoğunlaşmaktadır. İnsanlar elektrik ve ısıl enerji üretmek için çeşitli yeşil enerji kaynakları kullanmaktadırlar. Temiz enerji kaynaklarından bazıları, hidrojen, güneş, rüzgâr ve jeotermal enerjidir. Bunların arasında güneş enerjisi, ucuz, bol, sistemlere uygunluğu ve sistemlere etkisinin kestirilebilir olması yönünden diğer enerji kaynaklarından bir adım öndedir [1,2]. Bu nedenle güneş enerjisinin gelecek için çok şey vaat ettiği iyi bilinmektedir. Bunun yanında, güneş enerjisinden ısıtma, soğutma, endüstriyel işlemler, elektrik üretimi gibi çok farklı alanlarda yararlanılmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre önümüzdeki otuz yılda, dünya genelindeki elektrik üretiminin %11 gibi önemli bir kısmının güneş enerjisi kaynaklı sistemler tarafından sağlanacağı tahmin edilmektedir.

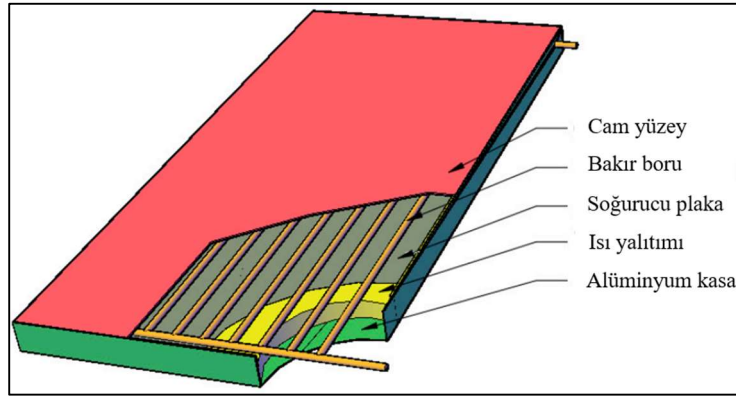
Güneş enerjisinden; ısıtma, soğutma, endüstriyel işlemler, elektrik üretimi gibi çok farklı alanlarda yararlanılmaktadır. Bu bölümde en çok uygulaması olan belli başlı güneş enerji sistemleri tanıtılmıştır.

1.1. GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİ

Güneş enerjisini kullanan sistemlerin başında güneş kolektörleri gelmektedir. Temel olarak üç tür güneş kolektörü vardır. Bunlar, düz plakalı, vakum tüplü ve yoğunlaştırıcı kolektörlerdir.

1.1.1. Düz Plakalı Kolektörler

Güneş kolektörleri, güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştüren özel bir ısı değiştirici türüdür. Düz plakalı güneş kolektörü en yaygın türdür ve "soğurucu plaka" adı verilen bir yüzey kullanarak güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştürür [3]. Soğurucu levhanın yüzeyi genellikle siyah mat boyalıdır veya güneşten en yüksek enerjiyi soğurmak için spektral olarak kaplanır [4,5]. Alınan güneş ışınımı, kolektörün soğurucu plakası tarafından emilir ve daha sonra ısı enerjisine dönüştürülür ve bu enerji kolektör tüplerinin içinde olan ısı transfer ortamına aktarılır. Düz plakalı güneş kolektörünün bileşenleri Şekil 1.1'de sunulmuştur.

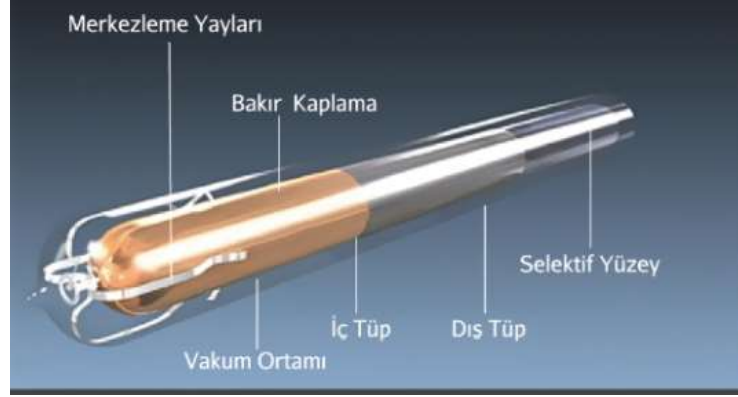


Şekil 1.1. Düz plakalı güneş kolektörü [6].

1.1.2. Vakum Tüplü Güneş Kolektörleri

Vakum tüplü güneş kolektörleri, düz plakalı güneş kolektörlerine göre daha ucuz olması ve mevsim şartlarından daha az etkilenmesinden dolayı daha çok tercih edilir ve daha yüksek verime sahiptir [7,8]. Vakum tüplü güneş kolektörleri etrafında vakum bulunan, güneşi emen seçici kaplamalı bir yüzeye sahip silindirik tüplerden oluşur.

Vakumlu bölge iletim ve konveksiyon yoluyla ısı kayıpları en aza indirmek için seçici kaplama üzerinde oluşturulur. Seçici kaplama tarafından emilen ısı enerji, ısı borusuna veya tüp içinde dolaşan akışkana aktarılır [9–11]. Güneş kolektörünün veriminin daha yüksek olmasını sağlayan vakum tüpü Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Vakum tüplü güneş kolektörünü oluşturan vakum tüpünün kısımları [12].

1.1.3. Yoğunlaştırıcı Güneş Kolektörleri

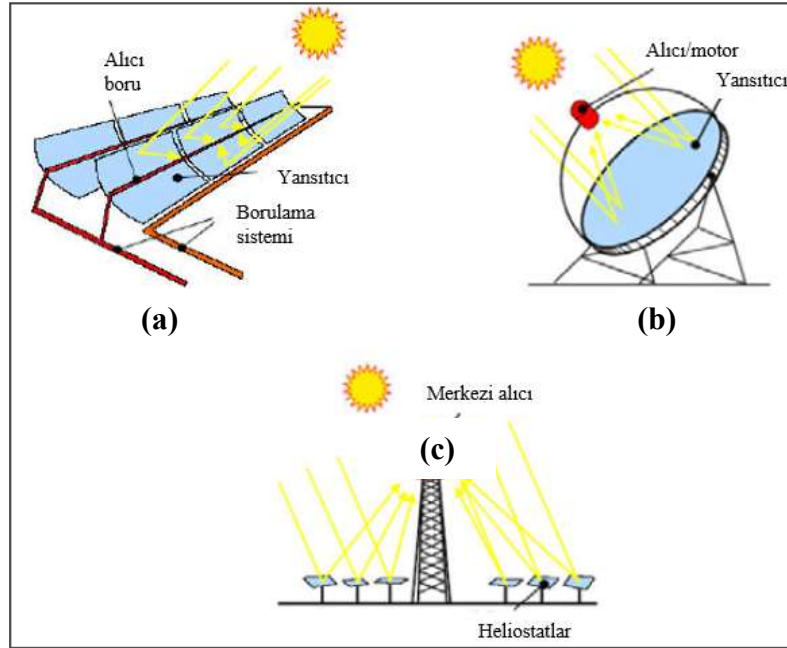
Yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemleri günümüzde gelişmekte olan bir teknolojidir ve yerleşik depolama kapasitesi, yüksek ekonomik getiri ve azaltılmış sera gazı emisyonları gibi önemli avantajlar sunar. Yoğunlaştırıcı güneş enerji tesislerinin yatırım maliyetleri diğer güneş enerji teknolojilerine kıyasla nispeten daha yüksek olmasına rağmen, yeni tesisler artan tesis verimliliği ile kendini kısa zamanda amorti etmektedir [13]. Yoğunlaştırıcı güneş enerji sistemleri genel olarak üç tipe sınıflandırılabilir. Bunlar oluk tipi, çanak tipi ve kule tipidir ve Şekil 1.3(a), (b) ve (c)’de gösterilmiştir.

(a) *Oluk Tipi Güneş Enerji Sistemleri*: Parabolik oluk şeklindeki yansıtıcıya sahiptirler. Bu yansıtıcı yüzeyler akışkanın içinden geçtiği alıcıya, güneş ışınlarını alıcı boyunca doğrusal bir şekilde yoğunlaştırır.

(b) *Çanak Tipi Güneş Enerji Sistemleri*: Çanak yoğunlaştırıcılar güneş enerjisiyle pişirme, su ısıtma, buhar üretim gibi farklı işlemler için kullanılabilir. Isıl uygulamalarda yüksek sıcaklıklar sağlamada kullanılır [14]. Çanak

yoğunlaştırıcılar güneş ışınlarını mükemmel yakın bir şekilde iki boyutta yoğunlaştırır ve bu yoğunlaştırılan ışınlar odak noktasındaki bir motoru veya türbini çalıştırır [15].

(c) *Kule Tipi Güneş Enerji Sistemleri*: Kulenin en üst kısmına montajı yapılmış merkezi alıcılar çok sayıda heliostat (gün gösterir) vasıtasıyla güneş ışınlarını yoğunlaştırırlar. Kule tipi güneş enerji sistemleri yoğunlaştırma oranları karşılaştırıldığında sırasıyla oluk tipine ve çanak tipine göre 10 kat ve 100 kat daha fazla yoğunlaştırma oranına sahiptirler [15].

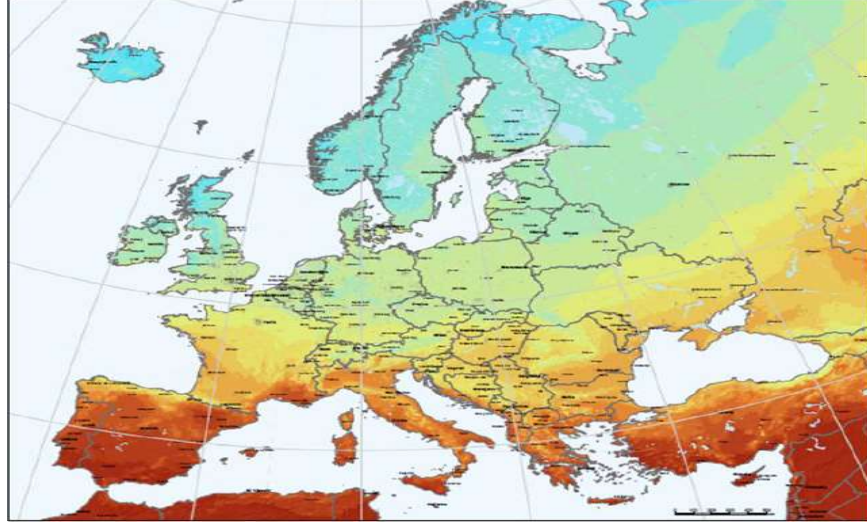


Şekil 1.3. Yoğunlaştırıcı güneş enerji sistemleri (a) Oluk tipi, (b) Çanak tipi, (c) Kule tipi [15].

1.2. TÜRKİYE'DE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ

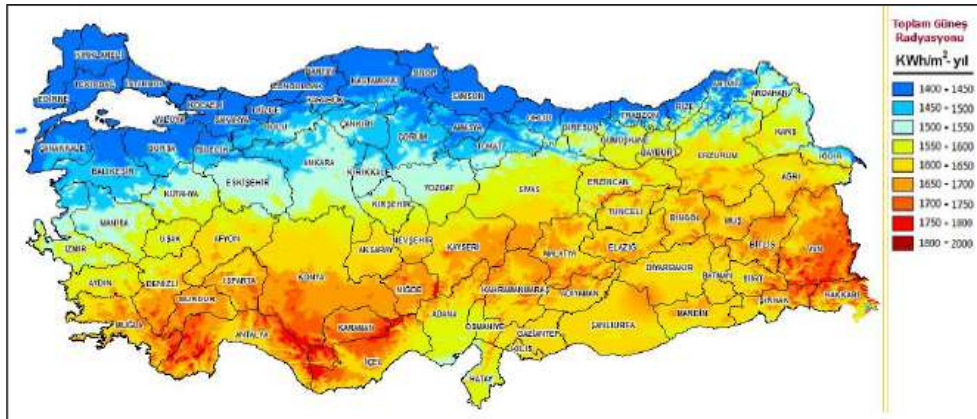
Güneş enerjisi uygulamaları, Türkiye'de uzun süredir kullanılmaktadır. 1960'larda araştırmacıların ilgisini çekerek güneş enerjisi uygulamaları yapılmaya başlanmıştır. 1970'lerin ortasına doğru, teknolojik gelişmelerin artmasıyla beraber güneş enerjisi uygulamaları sanayinin, devletin ve üniversitelerin daha çok ilgisini çekmeye başlamıştır.

Türkiye konum itibari ile güneş enerjisi kullanım potansiyeli yüksek ülkeler arasındadır. Şekil 1.4'den de görüldüğü üzere güneşli gün sayısının fazla olduğu ülkemiz, güneşlenme yüzey alanının fazlalığı sayesinde güneş enerjisinin kullanılma potansiyelini iyiden iyiye arttırmaktadır. Türkiye bu nedenle çoğu Avrupa ülkesinden güneş enerjisi potansiyeli açısından avantajlı konumdadır.



Şekil 1.4. Avrupa'nın güneş ışınımını gösteren harita [16].

Şekil 1.5'de ise Türkiye'nin yıllık ortalama güneş enerjisinden yararlanma haritası verilmiştir. Haritadan da görüldüğü üzere güneyden kuzeye doğru gidildikçe güneş ışınımı azalmaktadır. Buna bağlı olarak, genellikle Türkiye'de Akdeniz, Ege ve İç Anadolu Bölgesi'nde güneş enerjisi kullanım alanı daha fazladır.



Şekil 1.5. Türkiye'nin güneşlenme haritası [17].

BÖLÜM 2

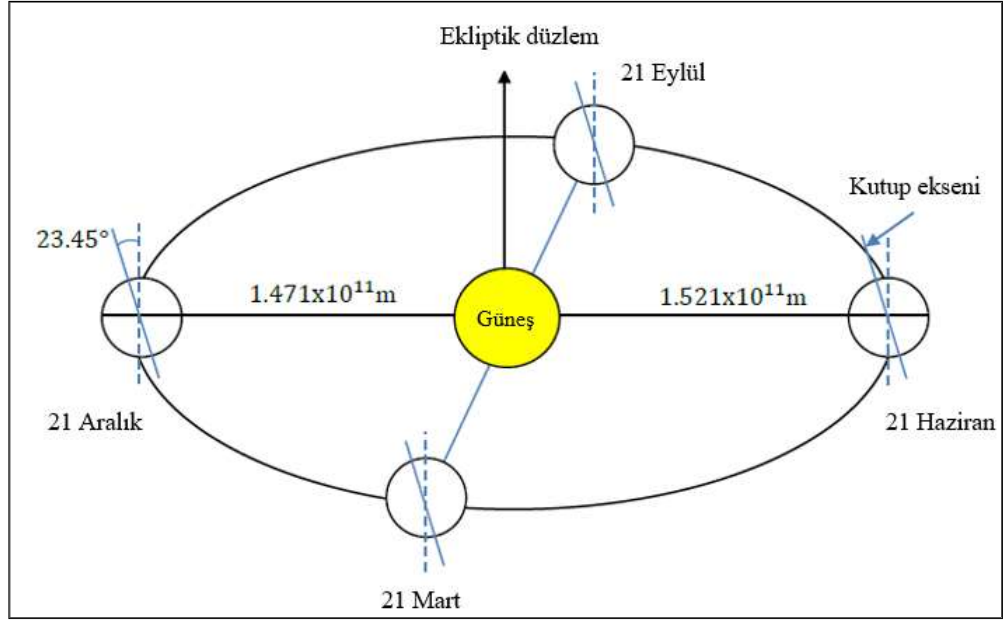
GÜNEŞ IŞINIMI

Güneş, yarıçapı $6,95 \times 10^8$ m ve dünyaya $1,5 \times 10^{11}$ m mesafesi olan bir küredir. Güneşin sıcaklığı 5777 K ve güneşin merkezindeki tahmini sıcaklık 8×10^6 K ile 40×10^6 K arasında değişmektedir. Yoğunluğu suyun yoğunluğundan 100 kat daha fazladır [18]. Güneş içerisinde sürekli bir füzyon reaktörü vardır ve güneş enerjisini sağlamak için tahmin edilen birçok füzyon reaksiyonu gerçekleştiği düşünülmektedir. Güneşteki ana reaksiyon bir helyum çekirdeğine hidrojenin bağlanmasıdır [19].

Bu bölümde Güneş-Dünya geometrik ilişkilerinden ve Güneş-Dünya açılarından bahsedilmiştir. Güneş-Dünya açıları kolektörler için önemli parametrelerdir. Kolektörlerin verimlerinin hesaplanması için bu açıların elde edilmesi gerekmektedir.

2.1. GÜNEŞ-DÜNYA GEOMETRİK İLİŞKİSİ

Dünya tarafından alınan yıllık güneş ışını miktarı dünya ile güneş arasındaki değişken mesafeye bağlı olarak değişmektedir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi tam 21 Aralık'ta, Dünya'nın Güneş'e olan uzaklığı minimum değer olan $1,471 \times 10^{11}$ m'dir ve bu duruma *günberi* denir. Tam 21 Haziran'da ise, Dünya'nın Güneş'e olan uzaklığı maksimum değer olan $1,512 \times 10^{11}$ m'dir ve bu duruma da *günötesi* denir [20]. Güneş ile Dünya arasındaki ortalama mesafe astronomik birim olarak adlandırılır ve bu değer $1,419 \times 10^{11}$ m'dir. Dünya, yörünge düzlemi eksenine göre $23,45^\circ$ eğik açığa sahip olarak bir eksen içinde kendi etrafında dönmektedir. Bu açı yıl boyunca Dünya'ya gelen güneş ışınımını önemli bir şekilde etkileyen bir faktördür [21].



Şekil 2.1. Dünya'nın Güneş etrafındaki hareketi [21].

2.2. GÜNEŞ-DÜNYA AÇILARI

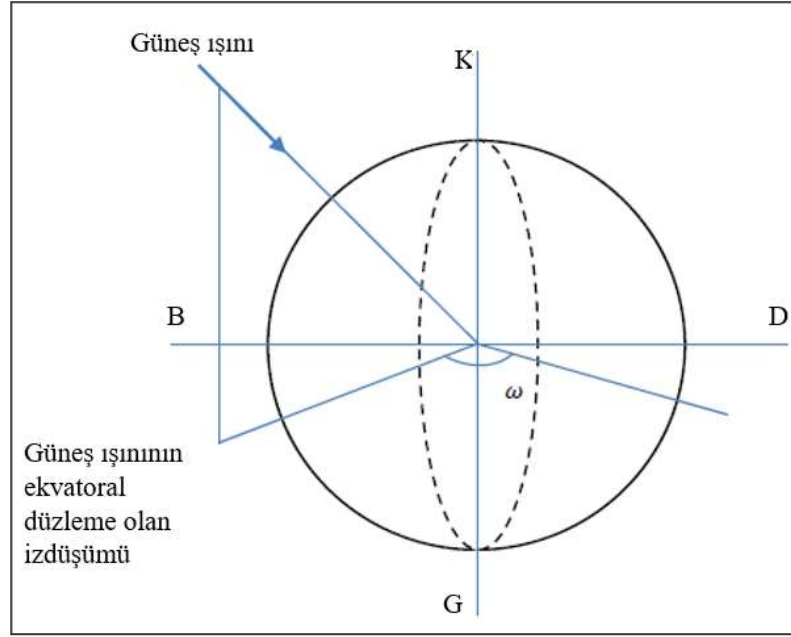
Güneş ile Dünya arasında çeşitli açılar vardır. Bu açılar, Bölüm 4'te detaylı olarak sunulan ve parabolik oluk tipi güneş kolektörüne (POTGÜK) ait yapılan ısı analiz hesaplarında optik verimin ve dolayısıyla kolektör verimi hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu açılar aşağıdaki gibi açıklanabilir.

2.2.1. Saat Açısı (ω)

Güneşin saat açısı, güneşin kutup eksenini etrafında doğudan batıya açısal yer değiştirmesidir [22]. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, saat açısı gün boyunca değişir. Örneğin, güneşin doğuş vaktinde herhangi bir konumda saat açısı -180° ile maksimum negatif değerini alır ve bu açı değeri güneşin tepe noktasına gelmesine kadar her saat başı 15° azalma gösterir. Tam öğle vakti bu açı 0° olur. Öğle vaktinden sonra güneş batana kadar her saat başı 15° artarak tam güneşin batımında maksimum pozitif $+180^\circ$ açı değerini alır [23]. Saat açısı derece olarak aşağıdaki formülle hesaplanabilir [22]:

$$\omega = 15(GYS - 12) \quad (2.1)$$

Burada *GYS*, güneş yerel saatini ifade etmektedir.



Şekil 2.2. Saat açısı gösterimi [24].

GYS, standart saat ile aynı anlamı ifade etmemektedir. Bu nedenle standart saati *GYS*'ye dönüştürmek gerekir. Bu dönüşüm aşağıdaki eşitlikle elde edilebilir [18]:

$$GYS = \text{Standart saat} + 4(L_{\text{standart}} + L_{\text{yerel}}) + E \quad (2.2)$$

Burada L_{standart} , standart boylamı, L_{yerel} ise yerel bölgedeki boylamı göstermektedir. Türkiye için standart boylam 45° doğu'dur. E terimi zaman sabiti olarak adlandırılır ve dakika biriminde aşağıdaki formülle hesaplanabilir [18]:

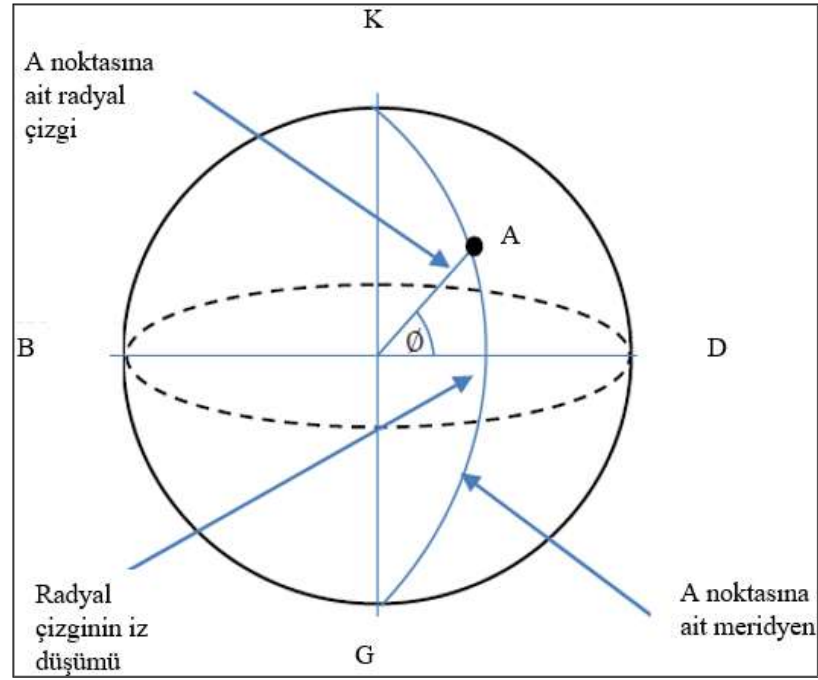
$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868\cos B - 0,032077\sin B - 0,014615\cos 2B - 0,04089\sin 2B) \quad (2.3)$$

B terimi ise derece olarak aşağıdaki ifade ile saptanabilir [18]:

$$B = \frac{(n-1)360}{365} \quad (2.4)$$

2.2.2. Enlem Açısı (\emptyset)

Şekil 2.3'te görülen Dünya üzerindeki bir konumda bir A noktası olduğunu varsayalım. Dünya merkezi ile A noktasının bulunduğu yeri radyal çizgi ile birleştirdiğimizde ekvator düzlemi ile radyal çizgi arasında kalan açığa enlem açısı denir [23]. Bu açı değeri +90 ile -90 arasında değerler alır. Bu değer Ankara/Türkiye için 39° dir.



Şekil 2.3. Enlem açısının gösterimi [24].

2.2.3. Güneş Eğim Açısı (δ)

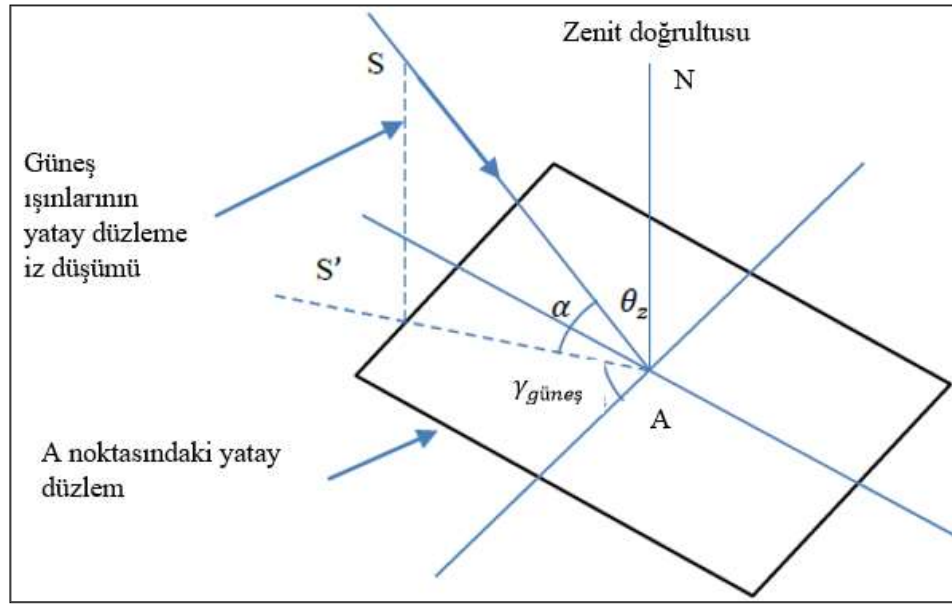
Güneş eğim açısı, dünyanın ve güneşin merkezlerini birleştiren bir çizgi ile dünyanın ekvator düzlemi üzerindeki çizginin izdüşümü arasındaki açıdır [23]. Bu açı, $+23,45^\circ$ ile $-23,45^\circ$ arasında yıl boyunca değişir ve aşağıdaki formülle hesaplanabilir [23]:

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (2.5)$$

Burada n yıl içerisindeki herhangi bir günü temsil etmektedir.

2.2.4. Zenit Açısı (θ_z)

Şekil 2.4'ü incelediğimizde, Dünya yüzeyinde bir A noktasına SA doğrultusundan güneş ışınları geldiğini ve NA doğrultusunu da Zenit yönü olarak varsaydığımızda SA ile NA doğrultuları arasında kalan açığa Zenit açısı denmektedir. Zenit açısı, gün batımı ve doğumunda yaklaşık olarak 90° 'dir [24].



Şekil 2.4. Zenit, azimut ve güneş irtifa açıları gösterimi [24].

2.2.5. Güneş İrtifa Açısı (α)

Güneş irtifa açısı, $S'A$ yatay doğrultusu ile SA doğrultusundan gelen güneş ışınları arasındaki açıdır. Şekil 2.4'den de farkedileceği üzere zenit açısı ile güneş irtifa açısının toplamı 90° 'dir. Güneş irtifa açısı aşağıdaki formülle hesaplanabilir [25]:

$$\sin \alpha = \cos \varnothing \cos \delta \cos \omega + \sin \varnothing \sin \delta \quad (2.6)$$

2.2.6. Güneş Azimut Açısı (γ)

Bu açının birçok tanımı vardır. Şekil 2.4'den görüldüğü üzere, genel olarak güney yön ile güneş ışınlarının iz düşümü arasındaki açı olarak tanımlanır ve aşağıdaki bağıntı ile saptanabilir [26]:

$$\sin(\gamma) = \frac{\sin\omega \cos\delta}{\cos\alpha} \quad (2.7)$$

2.2.7. Geliş Açısı (θ)

Geliş açısı, bir yüzeye çarpan güneş ışınları ile o yüzeyin normali arasındaki açı olarak tanımlanır. Geliş açısı gün ve yıl boyunca değişir ve alıcı tarafından kazanılan güneş enerjisini büyük ölçüde etkiler. Başka bir deyişle, bu açının kosinüsü artırılarak yararlanılacak olan güneş ışını miktarı azaltılır [18]. Geliş açısının hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır. Bu açı kolektöre ait optik verim ifadesinde kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega \\ & + \cos\delta \sin\phi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \quad (2.8)$$

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Parabolik oluk tipi güneş kolektörleri su ısıtma, elektrik üretimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kullanımı yaygın olduğu için parabolik güneş kolektörü ile ilgili hem deneysel hem de sayısal çalışmalar literatürde oldukça yer tutmaktadır. Bu çalışmaların amaçları arasında maliyeti azaltıp verimi yükseltmek, yeni efektif ölçüm metotları bulmak, güneş kolektörü alıcısı üzerindeki kaplamanın performansa etkilerini incelemek gibi parametreler bulunmaktadır [27,28]. Daha önce POTGÜK'e ait yapılmış çalışmalar ile ilgili literatür araştırması bu bölümde detaylı olarak sunulmuştur.

3.1. PARABOLİK OLUK TİPİ GÜNEŞ KOLEKTÖRLERİNDE ISI TRANSFER AKIŞKANI ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Isı transfer akışkanı güneş enerjisi uygulamalarında verimi etkilediği için önemli yer teşkil etmektedir. POTGÜK, 1870 yılında John Ericsson tarafından tasarlanmıştır. Çalışma akışkanı olarak hava kullanmıştır. Çalışmanın amacı ise buhar üreterek 373 W'lık bir motoru çalıştırmak olmuştur [29].

Xu vd. POTGÜK üzerinde farklı ısı transfer akışkanlarını (erimiş tuz ve sentetik yağ) kullanarak bir boyutlu zamana bağlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmadaki amaç zamana bağlı karakteristiklerin farklı ısı transfer akışkanları kullanıldığında değişimlerini incelemektir. Çalışmada akışkanların yanı sıra güneş ışınım şiddetini (400-1000 W/m²) ve kütleli debiyi (3-11 kg/s) değiştirerek POTGÜK'ün üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre erimiş tuz, sentetik yağa göre POTGÜK üzerinde daha iyi performans göstermiştir [30].

Aguilar vd. daha verimli POTGÜK elde etmek için süper-kritik karbondioksit (sCO_2) kullanarak bir boyutlu sayısal çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sayısal olan çalışma literatürdeki diğer benzer deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. sCO_2 kullanılarak alıcı ile ısı transfer akışkanının sıcaklık farkları ve ısı transfer katsayısı grafikleri çizilmiştir [31].

Kearney vd. erimiş tuz kullanarak POTGÜK tarlasında elektrik maliyet tutarını minimize etmek için Kaliforniya’da bir çalışma yapmışlardır. Çalışmadan erimiş tuzlar diğer literatürdeki ısı transfer akışkanlarına göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışma imkânına sahip olduğundan daha yüksek verim elde edilmiştir ve buradan da elektrik maliyetini azalttığı sonucuna ulaşılmıştır [32].

Selvakumar vd. düşük güneş ışıyım etkisinde terminol D-12 akışkanını kullanarak POTGÜK üzerinde deneysel olarak performans araştırması yapmışlardır. Terminol D-12 akışkanını ısı kararlılığından dolayı seçmişlerdir. Çalışmada POTGÜK verimi ve sıcaklık karakteristikleri ele alınmıştır. Parabolik yansıtıcının boyutları 1,2x0,6 m olarak boyutlandırılmıştır. Aynı zamanda çalışmada su ile terminol D-12 akışkanlarının performanslarına da yer verilmiştir. Terminol D-12 akışkanının suya göre yaklaşık %30 oranında daha performanslı olduğu çalışmadan elde edilen sonuçlar arasındadır [33].

3.2. POTGÜK ÜZERİNDE ISI TRANSFER PERFORMANS ARTTIRMA ÇALIŞMALARI

Genel olarak POTGÜK üzerinde ısı transferi arttırma çalışmalarında çalışma akışkanının değiştirilmesi, soğurucu boru içerisine kanatçık tarzı yapılar ekleme, soğurucu borunun malzemesinin değiştirilmesi gibi etmenler incelenmiştir. Bu etmenlerin ısı transferine etkisinin büyük olduğu ve POTGÜK’e ait ısı verimi arttırdığı görülmüştür. Aşağıdaki bölümlerde POTGÜK üzerinde ısı transferi arttırma çalışmalarına yönelik yapılan incelemeler ele alınmıştır.

3.2.1. Nanoakışkan Kullanımı

Isı transfer verimliliği genişletilmiş yüzeylerin kullanılması, ısı transfer yüzeylerine titreşim uygulanması ve mini/mikro kanalların kullanılması gibi çeşitli yöntemlerle geliştirilebilir. Ayrıca, cihazların ısı transfer verimliliği çalışma akışkanının, özellikle ısı iletkenlik ve özgül ısı gibi geliştirilmiş termofiziksel özellikleriyle de geliştirilebilir [34]. Özellikle metal katı partiküller, geleneksel sıvılara kıyasla yüz kat daha yüksek ısı iletkenliğe sahiptir [35]. Bu nedenle sıvılarda süspansiyon haline gelen katı partiküllerin ısı performansı üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. İlk süspansiyon edilmiş partikül boyutu milimetre veya mikrometre boyutlarındaydı [36–38]. Bununla birlikte, daha önceki yapılan çalışmalarda bu milimetre veya mikrometre boyutundaki parçacıklar, zayıf süspansiyon, düşük kararlılık ve kanal tıkanması gibi bazı sorunlara neden olmuştur. Bu problemleri çözmek için bir yolu nanometre boyutlu parçacıkların (1-100 nm) kullanılması olarak düşünülmüştür. Nanometre boyutundaki parçacıkların bir baz akışkanında süspansiyon haline getirilmesine nanoakışkan adı verilir ve 1995 yılında "nanoakışkan" terimi ilk olarak Choi ve Eastman tarafından ifade edilmiştir [39]. Nanoakışkanlar, mikro boyuttaki parçacıklarla elde edilen akışkanlara oranla daha kararlıdır, daha yüksek ısı iletkenliğe sahiptir, bu da pompalama gücünü azaltmaya ve daha iyi reolojik özelliklere sahip olmasına sebep olur [40–43].

Nanopartiküllerin akışkan içinde dağılmasıyla akışkanların yüzey alanı ve ısı kapasitesi artar. Bunun yanı sıra, nanopartiküller arasındaki etkileşimler ve çarpışmalar akışkan yüzeyini ve akış geçişini artırır. Ayrıca dispersiyon işlemi akışkan içindeki türbülans ve yoğunluğu artırır. Bu olay, taşınım ile gerçekleşen ısı transfer oranını artırır [44–46].

Nanoakışkanlar metalik ve metalik olmayan olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Metalik nanoakışkanlar şunlardan oluşur: baz akışkanlar (etilen glikol, su, yağ) ve metalik nanopartiküller (Cu, Al, Zn, Ni, Si, Fe, Ti, Au ve Ag) ve metalik olmayan nanopartiküller (Al_2O_3 , CuO, SiC, ZnO, TiO_2). Ek olarak, farklı yapılarda (tek duvarlı, çok duvarlı) karbon nanotüpler kullanılarak, kompozit yapılardaki (alaşımlar gibi)

nanopartiküller ve diğer nano boyutlu malzemeler kullanılarak nanoakışkanlar üretilir [47–50].

Isı transfer davranışı geleneksel katı-sıvı süspansiyonlarla karşılaştırıldığında, nanoakışkanlar farklı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar aşağıdaki gibi açıklanabilir [51–55]:

- (a) Daha düşük nanopartikül çapı, geleneksel katı-sıvı solüsyonlardan daha az çökelme meydana getirir.
- (b) Nanopartiküllerin Brownian davranışı daha yüksek kararlılıktadır.
- (c) Nanoakışkanların üretimi farklı nanopartikül boyutu ve yüzey modifikasyonları ile yapılabildiğinden ısı iletkenlik ve daha geniş yüzey alanı gibi ayarlanabilir özelliklere sahiptir. Bu da istenilen performansa sahip nanoakışkanın elde edilmesine olanak sağlar.
- (d) Aynı miktarda ısı transferi için baz akışkandan daha düşük pompalama gücüne sahip olmasıdır.

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere nanoakışkanlar umut vadeden bir ısı transfer akışkanıdır. Bu nedenle nanoakışkanlar üzerinde çalışmalar birçok alanda hızlı bir şekilde devam etmektedir. Bunlardan birkaçı aşağıdaki gibidir:

Xie vd. Al_2O_3 nanopartikülünü kullanarak farklı nanopartikül hacimsel oranlarında oluşturulan nanoakışkanın ısı iletkenlik katsayısını deneysel olarak saptamışlardır. Çalışma sonucundan nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte ısı iletkenlik katsayısının arttığı elde edilmiştir. Nanoakışkanın ısı iletkenlik katsayısındaki en fazla artış yaklaşık %29 olarak belirlenmiştir ve bu artış nanopartikül hacimsel oranının %5 olduğu değerde görülmüştür [56].

Peyghambarzadeh vd. bir araba radyatöründe deneysel olarak su ve etilen glikol baz akışkanları ile $\gamma-Al_2O_3$ nanoparküllerinden oluşan farklı nanoakışkanlar ile ısı transfer çalışması yapmışlardır. Çalışmayı hem laminer hem de türbülanslı akış rejiminde gerçekleştirmişlerdir. Nanopartikül hacimsel oranı %0-%1 arasında değiştirilmiştir.

Baz akışkanlara %1 oranında nanopartikülün eklenmesiyle Nusselt sayısındaki artışın %40'lara ulaştığı belirlenmiştir. Bu sonucun otomotiv sektörü için tatmin edici bir netice olduğu kararlaştırılmıştır [57].

Zamzamian vd. bir plakalı ısı değiştiricide CuO/EG nanoakışkanı vasıtasıyla zorlanmış taşınım ve türbülanslı akış koşullarında plakalı ısı değiştiricinin ısı transfer performansı hakkında bilgi sahibi olmak için bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonuçları değerlendirildiğinde nanopartikül oranının değişmesiyle birlikte ısı transfer performansındaki artış en yüksek %37 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Al_2O_3 nanopartikülü de kullanılarak CuO nanopartikülü ile ısı transferi performans karşılaştırılması yapılmıştır [58].

Namburu vd. dairesel kesitli bir kanal içerisinde sayısal olarak farklı nanoakışkanlar (Al_2O_3 , SiO_2 , CuO) kullanarak sabit ısı akısı sınır şartıyla türbülanslı akışta ısı transfer karakteristiklerini inceleyen çalışma yapmışlardır. Su ve etilen glikol olmak üzere iki farklı baz akışkan kullanılmıştır. Nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değiştiği göz önüne alınmıştır. Çalışmanın doğruluğu literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırılmıştır ve hata miktarının makul derecede olduğu görülmüştür. Çalışma sonucuna göre sabit bir Reynolds sayısında, %6'lık nanopartikül hacimsel oranına sahip CuO/su nanoakışkanı kullanıldığında Nusselt sayısında %35'e yakın bir artış olduğu bulunmuştur [59].

Abu-Nada geri basamak geometrisine sahip iki boyutlu bir kanal içerisinde farklı nanoakışkanlar ve nanopartikül hacimsel oranı kullanarak ısı transfer karakteristiklerini sayısal olarak incelemiştir. Nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişmediği kabul edilmiştir. Akışın laminer rejimde olduğu varsayılmıştır ($200 \leq Re \leq 600$). Baz akışkan su içine Cu, CuO, Al_2O_3 , Ag, TiO_2 olmak üzere beş farklı nanopartikül eklenerek analizler yapılmıştır. Çalışma sonucunda bütün Reynolds sayılarında ve bütün nanopartikül tiplerinde nanopartikül hacimsel oranı arttıkça ısı transfer karakteristiklerinde gözle görülür şekilde bir artışın olduğu saptanmıştır [60].

Buraya kadar olan çalışmalar nanoakışkanların çeşitli uygulamalarının özeti şeklindedir. Bu tezin konusu POTGÜK olduğundan dolayı literatürde nanoakışkan kullanılarak yapılan çalışmalarda nanoakışkanın POTGÜK üzerinde ısı transferi yönünden kullanımının avantajlı olduğu bulunmuştur. Bu çalışmalar aşağıdaki gibidir:

Kasaeian vd. çift duvarlı karbon nanotüp (MWCNT)/yağ nanoakışkanının POTGÜK üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Nanopartikül hacimsel oranı %0,2 ve %0,3'tür. 0,8 mm kalınlığındaki çelikten üretilen parabolik yansıtıcı 2 m uzunluğunda 0,7 m genişliğinde seçilmiştir. Kenar açısı (rim angle) 90°'dir. Bu çalışmada hem nanoakışkanın hem de alıcının etkisi araştırılmıştır. Siyaha boyanmış çelik alıcı, siyah krom kaplı bakır alıcı, siyah krom kaplı olup cam zarf ile alıcı arasındaki havanın vakumlanmamış haldeki alıcı ve vakumlu siyah kaplı alıcı olmak üzere 4 farklı alıcı kullanılarak verim üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma neticesinde %0,2 ve %0,3 nanopartikül hacimsel oranlarındaki nanoakışkan kullanıldığında verimde yaklaşık %5 ve %7 oranında artış gerçekleştiği görülmüştür [61].

Sokhansefat vd. üç boyutlu tam gelişmiş türbülanslı akış rejiminde Al_2O_3 /sentetik yağ nanoakışkanının, homojen olmayan (nonuniform) ısı akısına sahip POTGÜK alıcısını ele alarak ısı transfer karakteristiklerini sayısal olarak incelemiştir. Sentetik yağdaki Al_2O_3 nanopartikül hacimsel oranının alıcı üzerindeki ısı transfer hızına etkisi de araştırılmıştır. Çalışma sıcaklıkları olarak 300 K, 400 K ve 500 K seçilmiştir. Alıcının çevresine etki eden homojen olmayan ısı akısı Monte Carlo Işın İzleme Metodu (Monte Carlo Ray Tracing) ile elde edilmiştir. Baz akışkandaki nanopartiküllerin hacimsel oranı arttıkça ısı transfer katsayısının arttığı çalışma sonuçları arasında yer almıştır [62].

Kaloudis vd. LS-2 modülü (ölçüleri standartlaştırılmış bir POTGÜK) için, bir kaç farklı nanopartikül (Al_2O_3) hacimsel oranları (%0-%4) için toplam 20 farklı simülasyon gerçekleştirerek LS-2'nin verimliliği üzerinde parametrik bir çalışma yapmışlardır. Baz akışkan Syltherm 800'dür. Çalışma sonucunda %4'lük Al_2O_3 hacimsel oranı için kolektör verimliliğinde %10'a varan artış bildirilmiştir [63].

Potenza vd. tarafından ilk kez gaz fazındaki nanoakışkanlara dayanan şeffaf alıcılı yüksek sıcaklıkta çalışan yeni bir POTGÜK üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Hava içine basınçlı hava üfleci ile dağıtılmış CuO nanopartiküllerinden oluşan bir çalışma akışkanı kullanılmıştır. Çalışma sonucuna göre en önemli verinin nanoakışkan kullanımının POTGÜK ısı transfer performansı üzerinde etkisinin büyük olduğudur [64].

Bellos ve Tzivanidis tarafından termal yağda (Syltherm 800) dağılmış çeşitli nanopartiküllerin (Cu, CuO, Al₂O₃, SiO₂, TiO₂, Fe₂O₃) kullanımının LS-2 alıcısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 50 ila 300 lt/dk akış debileri için, 300 K ila 650 K giriş sıcaklıkları için ve %6'ya kadar nanopartikül hacimsel oranları için ayrıntılı bir parametrik analiz yapılırken, güneş ışınımı şiddetinin kolektör verimliliği üzerindeki artış etkisi ayrıca araştırılmıştır. 150 lt/dk akış debisi ve 600 K giriş sıcaklığına sahip çalışma koşulları için, kolektör veriminin artışı sırasıyla %2, %4 ve %6 Cu nanopartikül hacimsel oranları için %0,31, %0,54 ve %0,74 olarak bulunmuştur. Ayrıca Cu nanopartiküllü nanoakışkan en yüksek verime sahipken, SiO₂ nanopartiküllü nanoakışkan en düşük verime sahip olduğu görülmüştür [65].

Khakrah vd. bir çalışmasında, çeşitli parametreler olan rüzgâr hızı büyüklüğü, nanopartikül hacimsel oranı ve akışkanın giriş sıcaklığı gibi değişkenler yoluyla POTGÜK'lerin verimliliğini incelemek için sayısal bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Baz akışkana metalik nanopartikül ilavesinin avantajını incelemek için çalışma akışkanı olarak nanoakışkan seçilmiştir. Çalışma neticesinde baz akışkan olan sentetik yağa %5 hacimsel oranında Al₂O₃ ilavesiyle %14,3 verimlilik artışı elde edilmiştir [66].

Risi vd. gaz fazında hava bazlı CuO ve Ni nanoakışkan kullanılan bir POTGÜK için optimizasyon gerçekleştirmek için bir model oluşturmuşlardır. Optimizasyonda en yüksek kolektör verimi, %0,3 nanopartikül hacimsel oranı için %62,5 olarak elde edilmiştir [67].

Bellos vd. bir POTGÜK üzerinde nanoakışkanın etkisini inceleyen sayısal bir çalışma yapmışlardır. CuO nanopartikülleri ısıtılacak yağa ve nitrat erimiş tuza homojen bir şekilde

eklenerek iki farklı nanoakışkan elde edilmiştir. Analizler, çeşitli durumlar için SolidWorks Flow Simulation ile gerçekleştirilmiştir. Yağ bazlı nanoakışkan kullanımı ile %0,76'ya kadar ısıl iyileştirme olurken, eriyik tuz bazlı nanoakışkan ise %0,26'da kalmıştır [68].

Mwesigye vd. ısı transfer akışkanı olarak Cu-Therminol®VP-1 nanokışkan kullanan yüksek nanopartikül oranlı POTGÜK'ün ısıl ve termodinamik performansı üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada POTGÜK yoğunlaştırma oranı 113 ve kenar açısı 80° olarak kullanılmıştır. Hem baz akışkanın hem de bakır nanopartiküllerin ısıl fiziksel özellikleri sıcaklığa bağlı olarak kabul edilmiştir. Alıcı üzerine homojen olmayan ısı akısı sınır koşulu uygulanmıştır. Çalışma sonucuna göre ısıl performans nanoapartikül hacimsel oranın artmasıyla beraber artmakta olduğu ve kolektör veriminin %12,5'e kadar arttığı bulunmuştur. Ayrıca 45 m³/sa'in altındaki akış hızları için entropi oluşturma oranı %30'a kadar azaldığı da bulunmuştur [69].

3.2.2. Hibrit Nanoakışkan Kullanımı

Hibrit nanoakışkanlar, geleneksel ısı transfer akışkanlarından (yağ, su ve etilen glikol) ve tek nanopartiküllü nanoakışkanlardan daha iyi ısı transfer performansı ve termofiziksel özellikler sunan potansiyel akışkanlardır. Hibrit nanoakışkan, iki farklı nanopartikülün geleneksel ısı transfer sıvısına dağıtılmasıyla sentezlenen yeni bir nanoteknoloji akışkanıdır [70,71].

Teknolojinin gelişmesiyle hibrit nanoakışkanlar birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Suresh vd. tarafından ısı transfer özelliklerini araştırmak için Al₂O₃-Cu/su hibrit nanoakışkan ile deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar göre taşınım ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca hibrit nanoakışkana ait Nusselt sayısı saf suya kıyasla %13,56 artmıştır [72].

Balla vd. CuO-Cu/su hibrit nanoakışkanın hidrodinamik ve ısıl davranışını dairesel kesitli bir kanalda araştırmışlardır. Sonuçlar ısı transfer katsayısının nanopartikül tipi ve hacimsel oranından büyük ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Belirli bir Reynolds sayısında, hibrit nanoakışkan içindeki bakır nanopartiküllerin hacimsel oranının

arttırılmasıyla, Prandtl sayısı artmıştır, buna bağlı olarak Nusselt sayısı ve buna karşılık gelen taşınım ısı transfer katsayısı da artmıştır. CuO-Cu/su hibrit nanoakışkanı kullanılarak, suya göre %1 nanopartikül hacimsel oranında Nusselt sayısının %35, taşınım ısı transfer katsayısının da %40 arttığı bildirilmiştir [73].

Takabi vd. yatay dairesel bir tüpteki Al₂O₃-Cu/su hibrit nanoakışkanın ısı transfer özelliklerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Akışın türbülanslı olduğu ve sabit ısı akısına maruz kaldığı varsayılmıştır. Hibrit nanoakışkana ait Nusselt sayısını değerlendirmişler ve sonuçları Al₂O₃/su nanoakışkanı ve su ile karşılaştırmışlardır. Bakır nanopartiküllerin alüminyum nanopartikülleri ile birleştirilmesiyle edilmeyle Nusselt sayısının %32,07, Al₂O₃/su nanoakışkanı için ise baz akışkana göre %13,68 arttığı saptanmıştır [74].

Hibrit nanoakışkanların güneş enerjisi alanında da umut vadeden bir ısı transferi akışkanı olduğu son zamanlarda anlaşılmaya başlanmıştır. Bu nedenle özellikle POTGÜK üzerinde hibrit nanoakışkanların etkisini araştıran çalışmalar azınlığı temsil etse de artış göstermektedir. Bellos ve Tzivanidis POTGÜK üzerinde tek nanopartiküllü nanoakışkanların ve hibrit nanoakışkanların kullanımını incelemişlerdir. LS-2 modülünde, baz akışkan olarak Syltherm 800 ile çalışılmıştır. Nanopartikül hacimsel oranı %3 olarak sabit alınmıştır. Çalışmada %3 Al₂O₃/yağ, %3 TiO₂/yağ ve %1,5 Al₂O₃-1,5 TiO₂/yağ akışkanları kullanılmıştır. Çalışma neticesinde, hibrit nanoakışkan incelenen durumlar arasında en iyi çalışma akışkanı olarak bulunmuştur. Hibrit nanoakışkan ile kolektör verimlilik artışı %1,8'e kadar çıkmaktadır. Nusselt sayısındaki artışın hibrit nanoakışkan ile %178'e kadar çıktığı hesaplanmıştır [75].

Minea ve El-Maghlany hem hibrit nanoakışkanlar hakkında güneş enerjisi alanında bilgi veren hem de hibrit nanoakışkanların (Al₂O₃-Cu/su, MgO-Cu/su) POTGÜK alıcısı üzerinde kullanılmasından oluşan bir kapsamlı çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, literatürde nanoakışkanların kullanımına ilişkin bazı araştırmalar bulunsa bile, hibrit nanoakışkanların şimdiye kadar güneş enerjisi sistemlerindeki uygulamaları için azınlığı temsil etmekte olduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni olarak hibrit nanoakışkanların çok yeni bir ısı transfer akışkanı olması ve araştırmaların hala

çeşitli termofiziksel özellikler ve hazırlama yöntemleriyle sınırlı olması gösterilmiştir. Ortalama Nusselt sayısındaki en yüksek artış %2 nanopartikül hacimsel oranına sahip MgO-Cu/su hibrit nanoakışkanında elde edilmiştir. Burada artış, baz akışkan ile kıyaslandığında neredeyse %14'tür. Ayrıca araştırmacılar, güneş enerjisi uygulamalarında akışı genellikle laminer rejim şartlarında gerçekleştirmişlerdir. Bu nedenle, hibrit nanoakışkanların laminer akışlardaki davranışını tam olarak anlamak için önemli ölçüde deneysel ve sayısal çabaya ihtiyaç olduğunu da belirtmişlerdir [76].

Al-Oran vd. LS-2 modülünde farklı tek nanopartiküllü nanoakışkanlar ve hibrit nanoakışkanlar kullanılarak ısı transferi artışını gözlemlemek ve karşılaştırmak için bir çalışma yapmışlardır. Al_2O_3 , CeO_2 , CuO tek nanopartiküllerinin ve Al_2O_3 'ün ve CuO'nun CeO_2 ile hibrit kombinasyonlarının bir baz akışkan olan Syltherm 800'e eklenmesiyle beş farklı durum incelenmiştir. Araştırmada analizi kolaylaştırmak ve aynı koşullarda çeşitli sonuçları karşılaştırmak için tüm nanoakışkanlar için toplam nanopartikül hacimsel oranı %4'tür ve hibrit nanoakışkanlar için karışım oranı ise 50:50 (Örnek: %50 Al_2O_3 -%50 CuO/Syltherm 800) olarak sunulmuştur. Çalışmadan elde edilenler arasında Al_2O_3 ve CeO_2 hibrit nanoakışkanları kullanmanın kolektör ve ekserji verimliliğine etkisi sırasıyla %1,09 ve %1,03 artışa neden olduğu saptanmıştır. Nusselt sayısı ve ısı transfer katsayısı için sırasıyla %167,8 ve %200,7 artış gerçekleşmiştir. Ayrıca, hibrit nanoakışkanlar daha düşük basınç düşüşü sunarak tek nanopartiküllü nanoakışkanlara göre daha yüksek avantaja sahip olduğu görülmüştür [77].

Ekiciler vd. POTGÜK alıcısını kullanarak sayısal olarak Ag-ZnO/Syltherm 800, Ag-TiO₂/Syltherm 800 ve Ag-MgO/Syltherm 800 hibrit nanoakışkanları kullanarak ısı ve akış karakteristiklerini incelemişlerdir. Nanopartikül hacimsel oranı %1-4 arasında değiştirilmiştir. Çalışma sonucuna göre Ag-MgO/Syltherm 800 hibrit nanoakışkan en iyi performansı gösteren akışkan olarak belirlenmiştir [78].

3.2.3. POTGÜK Soğurucu Borusu Üzerinde Yapılan Değişikler

POTGÜK uygulamalarında ısı transferini arttırmanın diğer bir yolu da soğurucu boruda değişiklikler yapmaktır. Bu değişiklikler arasında soğurucu boruya türbülötör

yerleştirmek veya girdap oluşturacak şekilde soğurucu boru tasarlamak, soğurucu boruya sinüs dalgası şeklini vermek, soğurucu boruya yüzey pürüzlülüğü eklemek, soğurucu boruya kanatçık eklemek, soğurucu boru içindeki türbülansı arttırıcı plakalar ve helezon yaylar eklemek sayılabilir [79–83].

Okonkwo vd. LS-2 modülü kullanarak ısı transfer katsayısını arttırma yoluyla POTGÜK verimliliği üzerinde çalışmışlardır. Verimi etkileyen iki faktörün olduğunu ve bunların çalışma akışkanı ve soğurucu boru geometrisinin değişikliği olduğunu belirtilmiştir. Sıkıştırılmış su, süper kritik CO₂, Therminol VP-1, CuO/Therminol VP-1 , Al₂O₃/Therminol VP-1 ve Fe₃O₄/Therminol VP-1 olmak üzere altı farklı akışkanın verime etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, soğurucu boru sinüs dalgası şeklindeki yakınsak-ıraksak geometri olarak tasarlanmıştır. Bu geometriyi kullanmalarının amacını ısı transfer yüzeyini arttırmak ve soğurucu boru içindeki akışkanın türbülansını arttırarak, ısı transferini arttırmak olarak açıklamışlardır. Soğurucu borudaki geometri değişikliğinin kolektör verimini %1,13 oranında arttırdığı çalışmanın önemli sonuçları arasındadır [84].

Ahmed ve Natarajan toroidal halkalara sahip yeni bir POTGÜK alıcısını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmaya göre ısı olarak verimli emici %69,32 oranında daha yüksek bir verim sergilemiştir. Toroidal halkalara sahip alıcının Nusselt sayısının, düz alıcıdan 2,33 kat daha yüksek olduğu bulunmuştur [85].

Kurşun, POTGÜK soğurucu borusu içine akış yönünde sinüzoidal yüzeyli iç kanatçık kullanımının ısı ve akış karakteristiklerine etkisini incelemiştir. Çalışma sonuçlarına göre sinüzoidal yanal yüzey geometrisi, akışkanı farklı yönlere yönlendirmiş ve kanatçıklara yakın yerlerde taşınım ısı transferini arttırmıştır. Nusselt sayısındaki en yüksek artış sinüzoidal yanal yüzeye sahip kanatçık için %78 olarak gözlenmiştir [86].

3.3. ÇALIşMANIN AMACI

Literatürden de anlaşılacağı üzere POTGÜK içerisinde nanoakışkan kullanılan çalışmalar azınlığı temsil etmektedir. Bu çalışmada daha önce literatürde hiç denenmemiş boyutlarda bir POTGÜK kullanılarak deneysel ve sayısal çalışma

gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada EG-H₂O ve ZnO/EG-H₂O akışkanları kullanılarak POTGÜK'ün ısı ve hidrodinamik açıdan performansı incelenmiştir. Sayısal çalışmada ise, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak üç farklı hibrit nanoakışkan (Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O ve Ag-MgO/EG-H₂O) kullanılarak üç boyutlu ısı ve hidrodinamik özellikler incelenmiştir. Ayrıca, sayısal çalışmayı genişletmek amacıyla soğurucuya akış yönünde iki adet kanatçık eklenmiştir. Yukarıda bahsedildiği üzere daha önce hiç denenmemiş boyutlardaki POTGÜK kullanılarak hem tek nanopartiküllü hem de hibrit nanopartiküllü nanoakışkanların kullanımı ve soğurucu boru içerisine kanatçık eklenmesi bu çalışmanın özgünlüğünü ortaya çıkarmaktadır. POTGÜK kullanımının geniş alanlara yayılması ve nanoakışkan kullanımının son zamanlarda ilgi çekmesi sebebiyle bu çalışmada kullanılan POTGÜK'e ait incelemelerin literatürde ve uygulama alanında önemli bir boşluğu dolduracağına inanılmaktadır.

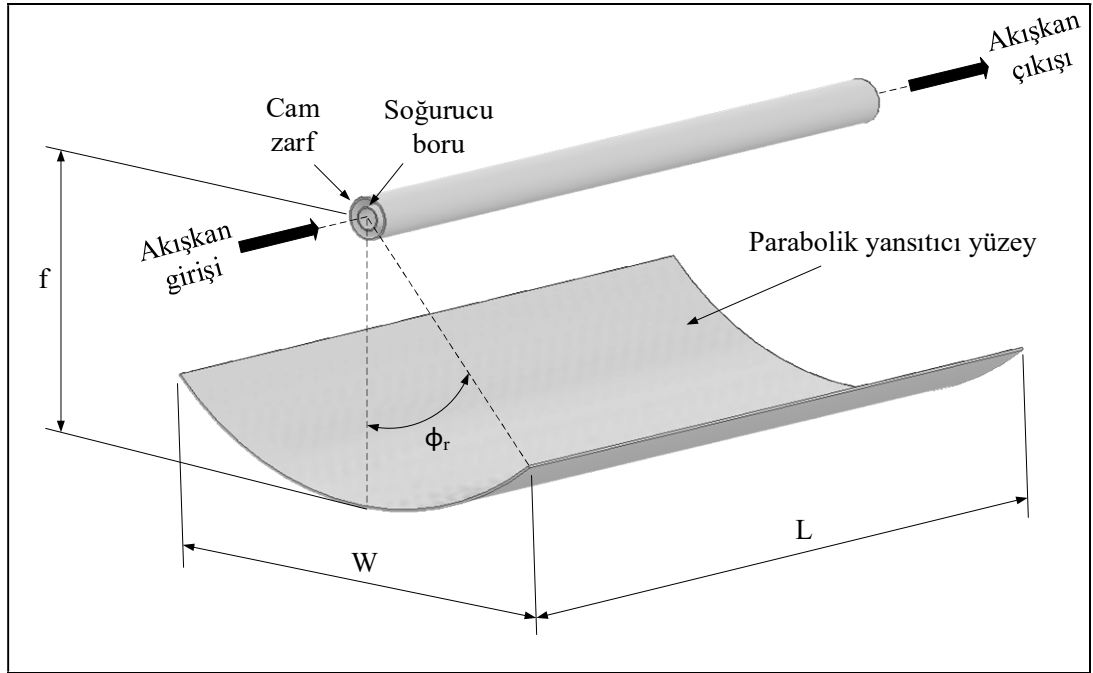
BÖLÜM 4

POTGÜK TASARIMI VE ISIL ANALİZİ

Bu bölümde, tasarım parametrelerinin daha iyi anlaşılması için POTGÜK'e ait parametreler tanıtılmıştır. Ayrıca POTGÜK üzerinde gerçekleşen ısı transfer mekanizmaları incelemeleri sonucu kolektöre ait verim ifade edilmiştir.

4.1. POTGÜK GEOMETRİSİ VE PARAMETRELERİ

POTGÜK'ler, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi parabolik bir şekle sahip yansıtıcı bir yüzey ve bir alıcıdan oluşur. Bu yüzey, güneş ışınlarının alıcı üzerinde yoğunlaşmasını sağlar. Şekilde de görüldüğü üzere W kolektör genişliğini, L kolektör boyunu, f kolektörün odak mesafesini ve ϕ_r ise kolektör kenar açısı olarak ifade edilir.



Şekil 4.1. Üç boyutlu POTGÜK parametreleri ve elemanları.

Parabolik şekle sahip olan yansıtıcı yüzey boyutlandırması genel olarak bilinen parabol denkleminde elde edilir. Şekil 4.2’de parabolik yansıtıcıya ait bir kesit verilmiştir. Bu yansıtıcıya ait parabol denkleminin aşağıdaki gibidir:

$$x^2 + (y-f)^2 = (y+f)^2 \quad (4.1)$$

eşitliği yazılır ve eşitlik düzenlenirse,

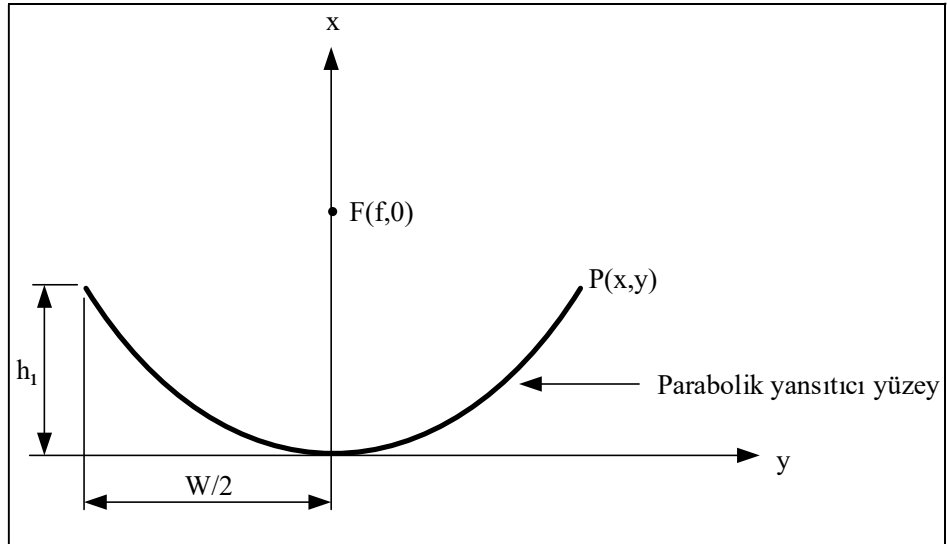
$$x^2 + y^2 - 2yf + f^2 = y^2 + 2yf + f^2 \quad (4.2)$$

elde edilir. Gerekli sadeleştirmeler yapırsa,

$$x^2 = 4yf \quad (4.3)$$

elde edilir.

Şekilde, $F(f,0)$ koordinatları odak noktasının koordinatlarıdır.



Şekil 4.2. Parabol parametreleri.

Kenar açısı (ϕ_r) aşağıdaki formülle edilir [87]:

$$\phi_r = \tan^{-1} \left[\frac{8 \left(\frac{W}{f} \right)}{16 - \left(\frac{W}{f} \right)^2} \right] \quad (4.4)$$

Kolektör toplam açıklık alanı (A_c) [m^2] ise şöyle bulunur [88]:

$$A_c = W \times L \quad (4.5)$$

Soğurucu boru alanı (A_r) [m^2] aşağıdaki formülle edilir [88]:

$$A_r = \pi d_{dış} L \quad (4.6)$$

Burada $d_{dış}$ [m] soğurucu boru dış çapını ifade etmektedir.

Kolektör yoğunlaştırma oranı (C) kolektörün toplam açıklık alanının soğurucu boru alanına oranı olarak ifade edilir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir [87]:

$$C = \frac{A_c}{A_r} \quad (4.7)$$

Yansıtıcı yüzey yarıçapı (r_m) [m] aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$r_m = \frac{2f}{1 + \cos \phi_r} \quad (4.8)$$

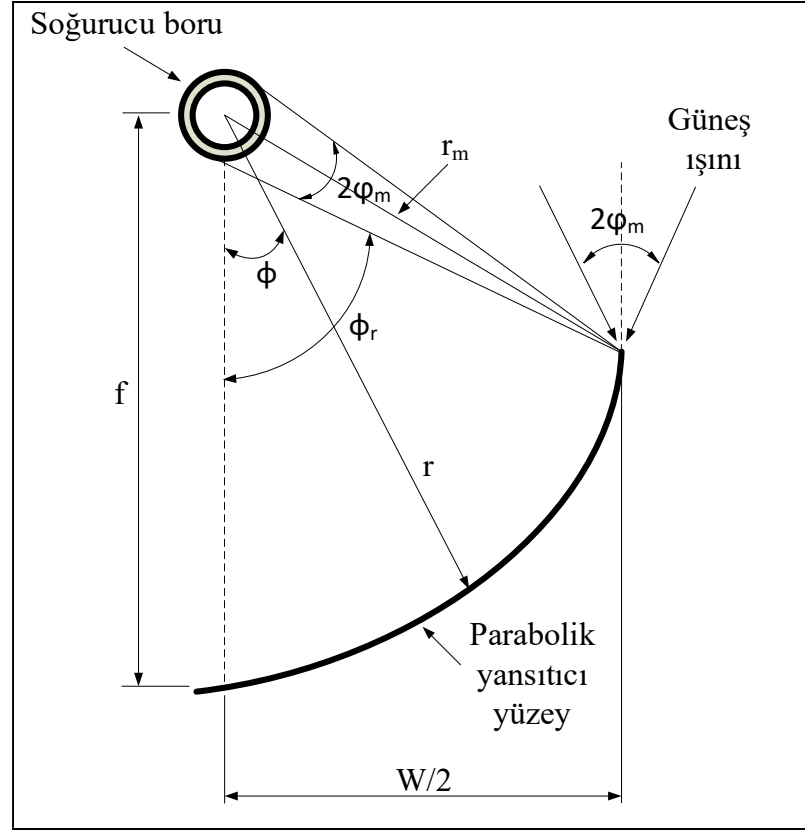
POTGÜK geometrisi üzerinde etkili olan diğer parametre ise yarım kabul açısıdır (ϕ_m) ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$C = \frac{\sin \phi_r}{\pi \sin(\phi_m)} \quad (4.9)$$

Soğurucu borunun verimli bir şekilde güneş ışınlarını ısı transfer akışkanına iletmesinde soğurucu boru çapının POTGÜK tasarımı üzerinde etkisi çok önemlidir. Bu nedenle soğurucu boru çapının belirlenmesi gerekir. Soğurucu boru çapının olması gereken minimum değerinin bulunmasına yarayan eşitlik aşağıdaki gibidir [87]:

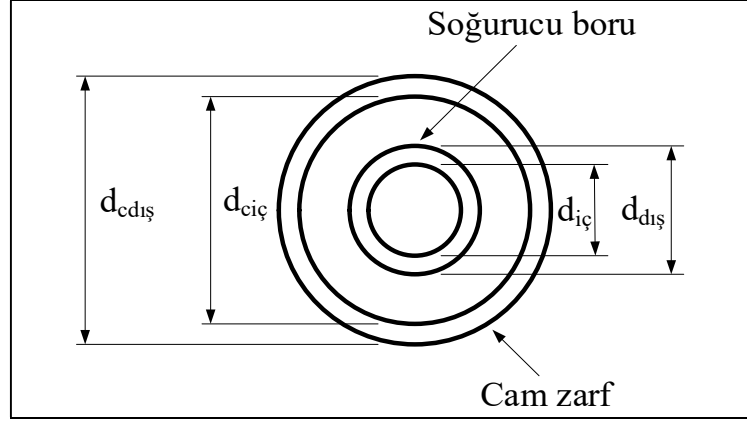
$$d_{dış} = 2r_m \sin \phi_m \quad (4.10)$$

Yukarıda anlatılan kenar açısı (ϕ_r) [$^\circ$], yansıtıcı yüzey yarıçapı (r_m) [m], yarım kabul açısı (ϕ_m) [$^\circ$] gibi parametreler Şekil 4.3'te gösterilmiştir [89].



Şekil 4.3. POTGÜK üzerindeki parametrelerin gösterimi.

Şekil 4.4'te gösterildiği gibi ısı transfer akışkanının içerisinden geçtiği alıcı genellikle bir cam zarftan ve soğurucu borudan oluşur. Cam zarf ile soğurucu boru arasındaki hava ısı kaybını azaltmak amacıyla vakum yoluyla boşaltılır.



Şekil 4.4. Alıcının kısımları.

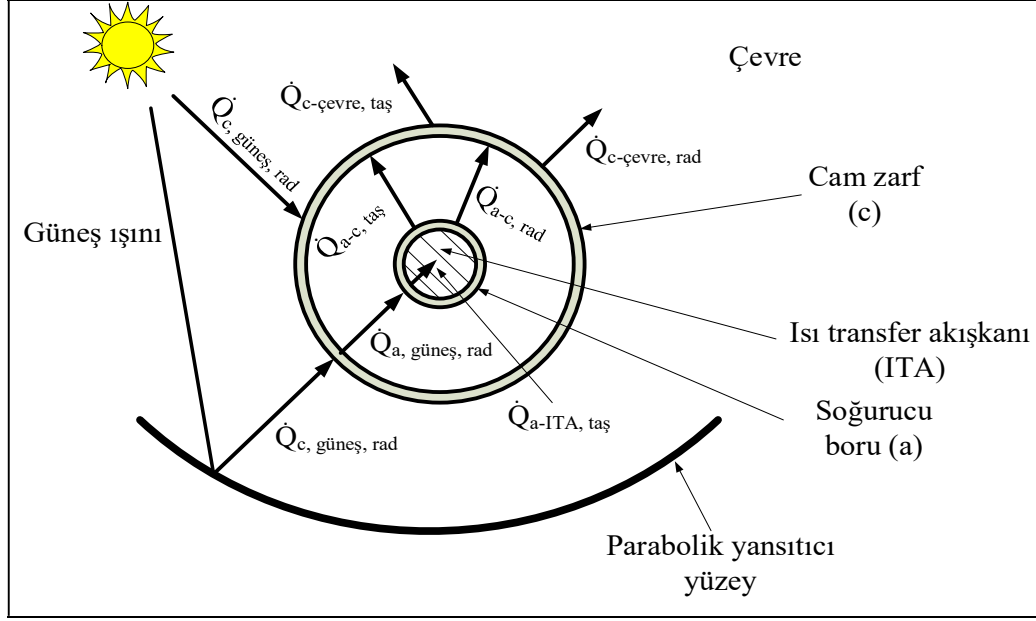
Çalışmada kullanılacak olan POTGÜK'e ait geometrik parametreler ve değerleri Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. POTGÜK'e ait geometrik parametreler.

POTGÜK Parametreleri	Değerler
Kolektör genişliği (W)	0,6 m
Kolektör boyu (L)	0,9 m
Odak mesafesi (f)	0,208 m
Kolektör kenar açısı (ϕ_r)	71,56°
Yarım kabul açısı (ϕ_m)	1,15°
Kolektör toplam açıklık alanı (A_c)	0,54 m ²
Soğurucu boru alanı (A_r)	0,036 m ²
Kolektör yoğunlaştırma oranı (C)	15 (-)
Soğurucu boru dış çapı ($d_{dış}$)	0,013 m
Soğurucu boru iç çapı ($d_{iç}$)	0,010 m
Cam zarf dış çapı ($d_{cdış}$)	0,030 m
Cam zarf iç çapı ($d_{ciç}$)	0,026 m
Yansıtıcı yüzey yarıçapı (r_m)	0,316 m

4.2. ISIL ANALİZ

Bu çalışmadaki model için ısı transferi mekanizması akışkan ve atmosfer arasındaki enerji dengesine dayanmaktadır. Alıcının bir boyutlu ve zamandan bağımsız enerji dengesine sahip bir kesiti Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Bu modelde, tüm ısı akılarının, sıcaklıkların ve termodinamik özelliklerin, alıcı çevresi etrafında homojen olduğu varsayılmaktadır. Güneşli bir günde, gelen bazı güneş ışınları parabolik yansıtıcı yüzey tarafından alıcı üzerine yoğunlaştırılır, bazıları ise direkt olarak alıcı üzerine gelir. Bu alıcı üzerine gelen güneş ışınlarından büyük bir kısmı alıcı tarafından emilemez. Geriye kalan az miktardaki güneş ışını cam zarf tarafından emilir ($\dot{Q}_{c, \text{güneş, rad}}$). Cam zarfın cidarlarından iletim (hesaplamalar sonucu etki değeri çok küçük olduğundan ihmal edilmiştir [77,90]) yoluyla geçen enerjinin kalan kısmı ($\dot{Q}_{a, \text{güneş, rad}}$) soğurucu boru tarafından emilir. Soğurucu boru tarafından emilen enerji, soğurucu borunun dış cidarlarından iç cidarına iletim (hesaplamalar sonucu etki değeri çok küçük olduğundan ihmal edilmiştir [77,90]) yoluyla aktarılır. En son kalan enerji ($\dot{Q}_{a-ITa, \text{taş}}$) de taşınım yoluyla ısı transfer akışkanına aktarılır. Diğer kalan enerji (başka bir deyişle, soğurucu boru tarafından emilemeyen enerji) taşınım (çalışmada soğurucu boru ve cam zarf arasındaki bölge vakumlanmış varsayıldığından, bu bölgede taşınım ısı transferi ihmal edilmiştir.) ($\dot{Q}_{a-c, \text{taş}}$) ve ışıınım ($\dot{Q}_{a-c, \text{rad}}$) yoluyla cam zarfa döner. Cam zarfa gelen enerji ise çevreye taşınım ($\dot{Q}_{c-\text{çevre, taş}}$) ve ışıınım ($\dot{Q}_{c-\text{çevre, rad}}$) yoluyla atılır.



Şekil 4.5. Alıcıya ait bir boyutlu enerji dengesi [91].

POTGÜK'e ait faydalı enerji, kaybolan enerji, optik verim ve en sonunda da kolektör veriminin analitik olarak hesaplanmasını sağlayan eşitlikler aşağıda verilmiştir. Bu analitik hesaplama bir boyutlu olarak ele alınmıştır. Ayrıca, yukarıda belirtildiği gibi soğurucu boru ve cam zarfın cidarlarında meydana gelen iletim ısı transferi ihmal edilmiştir. Yukarıdaki bahsedilen varsayımlar sonucu yapılan analitik ısıl analiz ile bulunan kolektör verimi deneysel çalışmadan elde edilen kolektör veriminin doğrulanmasında kullanılmıştır.

Çevre ile cam zarf arasında ışıınım ve taşınım ile ısı transferi gerçekleşir. Bu iki ısı transferi mekanizması ısıl kayıpları temsil etmektedir [77,90]. Kaybolan enerji ($\dot{Q}_{kayıp}$) [W] aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{kayıp} = \sigma \pi d_{cdış} L \varepsilon_c (T_c^4 - T_{çev}^4) + h_{çev} \pi d_{cdış} L (T_c - T_{çev}) \quad (4.11)$$

Burada $h_{çev} = V_w^{0,58} d_{cdış}^{0,42} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ çevre ile cam zarf arasındaki ısı transfer katsayısını ifade etmektedir. V_w [m/s] ise deneysel olarak ölçülen rüzgâr hızını göstermektedir. $\varepsilon_c = 0,9$ cam zarfa ait ışıınım yayma katsayısıdır. Ayrıca, T_c [K] ve $T_{çev}$ [K] sırasıyla cam zarf ve çevre sıcaklığını temsil etmektedir.

Vakumlanmış alıcıya sahip bir POTGÜK varsayıldığından cam zarf sıcaklığı çevre sıcaklığına yakındır ve bu nedenle Taylor serisi açılımından aşağıdaki eşitlik yazılabilir [90]:

$$T_c^4 - T_{\text{çev}}^4 \approx 4T_{\text{çev}}^3 (T_c - T_{\text{çev}}) \quad (4.12)$$

Eş. (4.11) ve (4.12) kullanılarak $\dot{Q}_{\text{kayıp}}$ [W] ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir [90]:

$$\dot{Q}_{\text{kayıp}} = [\sigma\pi d_{\text{cdış}} L \varepsilon_c (4T_{\text{çev}}^3) + h_{\text{çev}} \pi d_{\text{cdış}} L] [(T_c - T_{\text{çev}})] \quad (4.13)$$

Eş. (4.13) aşağıdaki şekilde de yazılabilir [90]:

$$\dot{Q}_{\text{kayıp}} = K_I (T_c - T_{\text{çev}}) \quad (4.14)$$

burada

$$K_I = \sigma\pi d_{\text{cdış}} L \varepsilon_c (4T_{\text{çev}}^3) + h_{\text{çev}} \pi d_{\text{cdış}} L \quad (4.15)$$

Soğurucu tüp ile cam zarf arası tam vakumlu varsayıldığından yalnızca ışıınım ile ısı transferi gerçekleşmektedir [90].

$$\dot{Q}_{\text{kayıp}} = \sigma\pi d_{\text{dış}} L \varepsilon_a^* (T_a^4 - T_c^4) \quad (4.16)$$

Burada T_a [K] soğurucu borunun sıcaklığını ifade etmektedir.

$$\varepsilon_a^* = \left[\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \left(\frac{A_{\text{dış}}}{A_{\text{ciç}}} \right) \right]^{-1} \quad (4.17)$$

Burada $\varepsilon_a = 0,3$ [18] soğurucu boruya ve $\varepsilon_c = 0,9$ [92] cam zarfa ait ışıınım yayma katsayısıdır. $A_{\text{dış}}$ [m²] ve $A_{\text{ciç}}$ [m²] sırasıyla cam zarfa ait yüzey alanı dış ve iç yüzey alanlarının ifade etmektedir.

Eş. (4.16), T_a [K] ve T_c [K] sıcaklıklarını $T_{\zeta ev}$ [K] cinsinden yazmak için aşağıdaki gibi yazılabilir [90]:

$$\dot{Q}_{kayıp} = \sigma \pi d_{dış} L \varepsilon_a^* (T_a^4 - T_{\zeta ev}^4) - \sigma \pi d_{dış} L \varepsilon_a^* (T_c^4 - T_{\zeta ev}^4) \quad (4.18)$$

Eş. (4.12) ve (4.14)'ü kullanarak $\dot{Q}_{kayıp}$ [W] aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{Q}_{kayıp} = [\sigma \pi d_{dış} L \varepsilon_a^* (T_a^4 - T_{\zeta ev}^4)] \left[1 + \frac{4 T_{\zeta ev}^4 \pi d_{dış} L \varepsilon_a^* \sigma}{K_1} \right]^{-1} \quad (4.19)$$

ya da

$$\dot{Q}_{kayıp} = K_2 (T_a^4 - T_{\zeta ev}^4) \quad (4.20)$$

burada

$$K_2 = [(\sigma \pi d_{dış} L \varepsilon_a^*)] \left[1 + \frac{4 T_{\zeta ev}^4 \pi d_{dış} L \varepsilon_a^* \sigma}{K_1} \right]^{-1} \quad (4.21)$$

Kolektöre giriş (T_g) [K] ve çıkış (T_{ζ}) [K] sıcaklıkları ile çalışma akışkanının kütleli debisinin belirlenmesinin ardından, sistemin faydalı enerjisi (\dot{Q}_k) [W] aşağıdaki eşitlik kullanılarak da elde edilebilir.

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_{ITA} c_{p_{ITA}} (T_{\zeta} - T_g) \quad (4.22)$$

Burada \dot{Q}_k [W] sistemin faydalı enerjisini, \dot{m}_{ITA} [kg/s] çalışma akışkanının kütleli debisini, $c_{p_{ITA}}$ [J/kgK] çalışma akışkanının özgül ısısını temsil etmektedir.

Ayrıca, faydalı enerji soğurucu boru içerisinde gerçekleşen taşınım ısı transferinden de elde edilebilir.

$$\dot{Q}_k = (\pi d_{iç} L) (h) (T_a - T_b) \quad (4.23)$$

Burada h (W/m²K) çalışma akışkanına ait ısı transfer katsayısı ve $T_b = \frac{T_c + T_g}{2}$ [K] çalışma akışkanı ortalama sıcaklığını ifade etmektedir.

Eş. (4.22) ve (4.23)'ü kullanarak faydalı enerji aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{Q}_k = \left[\frac{1}{(\pi d_i L) h} + \frac{1}{2 \dot{m}_{ITA} c_{p_{ITA}}} \right]^{-1} (T_a - T_g) \quad (4.24)$$

ya da

$$\dot{Q}_k = K_3 (T_a - T_g) \quad (4.25)$$

burada

$$K_3 = \left[\frac{1}{(\pi d_i L) h} + \frac{1}{2 \dot{m}_{ITA} c_{p_{ITA}}} \right]^{-1} \quad (4.26)$$

Eş. (4.20)'yi basitleştirmek (T_a [K] sıcaklığını yok etmek için) için aşağıdaki dönüşüm yazılabilir:

$$\dot{Q}_{kayıp} = K_2 (T_a^4 - T_g^4) - K_2 (T_g^4 - T_{çev}^4) \quad (4.27)$$

burada

$$T_a^4 - T_g^4 \approx 4 T_g^3 (T_a - T_g) \quad (4.28)$$

Eş. (4.25) ve (4.28) kullanılarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$T_a^4 - T_g^4 \approx \frac{4 T_g^3}{K_3} \dot{Q}_k \quad (4.29)$$

Eş. (4.27) ve (4.29) kullanılarak $\dot{Q}_{kayıp}$ [W] aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{Q}_{kayıp} = \frac{4T_g^3 K_2}{K_3} \dot{Q}_k + K_2 (T_g^4 - T_{\text{çev}}^4) \quad (4.30)$$

Soğurucu boru tarafından emilen enerji, faydalı enerji ve kaybolan enerjiye dönüşmektedir. Soğurucu boru tarafından emilen enerji ($\dot{Q}_k + \dot{Q}_{kayıp}$) [W] optik verim ile güneş ışınım şiddetinin çarpılmasıyla elde edilir ve eşitlik aşağıdaki gibidir:

$$\eta_{opt} \dot{Q}_{güneş} = \dot{Q}_k + \dot{Q}_{kayıp} \quad (4.31)$$

burada η_{opt} , kolektörün optik verimini ifade etmektedir. Optik verim, soğurucu boruya ulaşan enerjinin, kolektör açıklığına (yansıtıcı yüzeye) ulaşan enerjiye oranı şeklinde tanımlanır [93] ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir [94]:

$$\eta_{opt} = [\rho_{yy} \tau_c \alpha_a \gamma] [(1 - A_f \tan(\theta)) \cos(\theta)] \quad (4.32)$$

Burada $\rho_{yy}=0,69$ [95] yansıtıcı yüzey yansıtıcılığını, $\tau_c=0,9$ cam zarfın ışınım geçirgenliğini, $\alpha_a=0,9$ [96] soğurucu boru soğuruculuğunu, $\gamma=0,75$ [18] kesişme faktörünü (soğurucu boruya güneş ışınlarının ne kadar etki ettiğini gösterir), θ [°] geliş açısını (incidence angle), A_f [m²] ise geometrik faktörü ifade etmektedir.

Geometrik faktör (A_f) [m²] aşağıdaki şekilde hesaplanır [94]:

$$A_f = \frac{A_l}{A_c} \quad (4.33)$$

Burada A_c [m²] kolektör açıklık alanını, A_l [m²] ise yansıtıcı yüzeyin izdüşüm alanını ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [94]:

$$A_l = \left(\frac{2}{3} W h_l \right) + \left[f W \left(1 + \left(\frac{W^2}{48 f^2} \right) \right) \right] \quad (4.34)$$

Burada W [m] kolektör genişliğini, f [m] odak mesafesini ve h_l [m] ise parabolik yansıtıcı yüzeyin dik olarak yüksekliğini (Bkz. Şekil 4.2) ifade etmektedir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır [94]:

$$h_l = \frac{W^2}{16f} \quad (4.35)$$

Eş. (4.30) ve (4.31) kullanılarak faydalı enerji aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{Q}_k = \left[\eta_{opt} \dot{Q}_{güneş} - K_2 (T_g^4 - T_{çev}^4) \right] \left[1 + \frac{4T_g^3 K_2}{K_3} \right]^{-1} \quad (4.36)$$

ya da

$$\dot{Q}_k = K_4 \dot{Q}_{güneş} - K_5 (T_g^4 - T_{çev}^4) \quad (4.37)$$

burada

$$K_4 = \eta_{opt} \left[1 + \frac{4T_g^3 K_2}{K_3} \right]^{-1} \quad (4.38)$$

$$K_5 = K_2 \left[1 + \frac{4T_g^3 K_2}{K_3} \right]^{-1} \quad (4.39)$$

Kolektör verimi ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir [90]:

$$\eta_{isıl} = K_4 - K_5 \left[\frac{(T_g^4 - T_{çev}^4)}{A_c \dot{G}_T} \right] \quad (4.40)$$

BÖLÜM 5

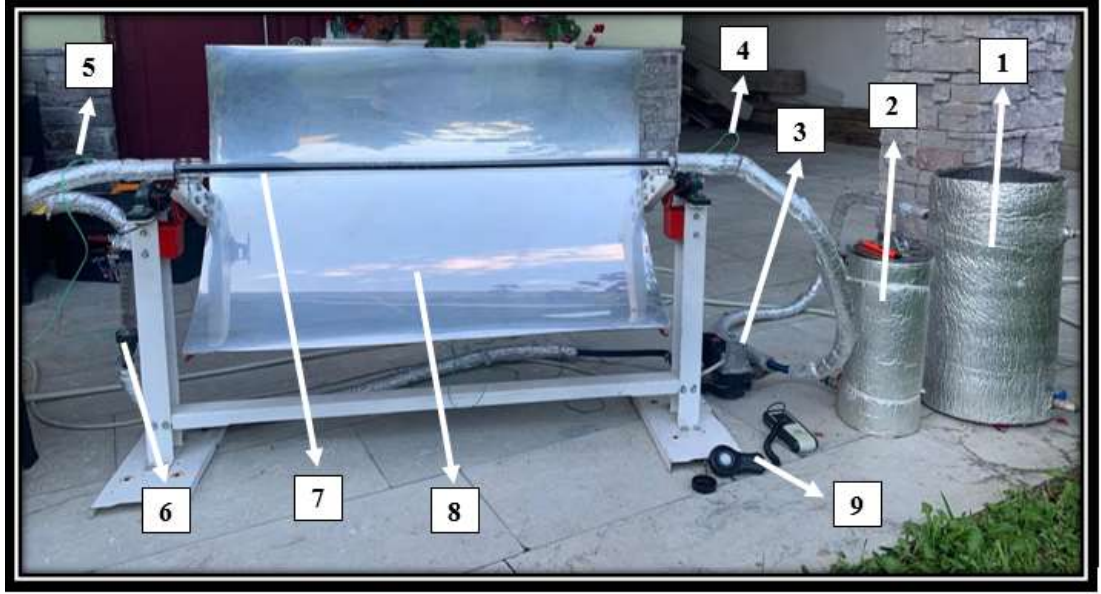
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Gerçekleştirilen çalışmanın bu kısmında, POTGÜK verimi farklı ısı transfer akışkanları (EG-H₂O ve ZnO/EG-H₂O) kullanılarak farklı debilerde (20 lt/sa, 40 lt/sa, 60 lt/sa ve 80 lt/sa) deneysel olarak elde edilmiştir. Ayrıca, ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının %1, %2, %3 ve %4 nanopartikül hacimsel oranlarının kolektör verimine etkisi belirlenmiştir.

5.1. DENEY DÜZENEGİ

POTGÜK'e ait verimlerin değişik akışkanlar kullanarak saptanması için bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneği Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi'nde tasarlanmıştır. Deneyler ise Ankara'da gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğine ait genel görünümü Şekil 5.1'de verilmiştir. Deneylerde, güneş ışınlarından daha iyi yararlanmak için POTGÜK kuzey-güney doğrultuda yerleştirilmiştir.

Deney düzeneği parabolik yansıtıcı, cam zarf ve soğurucu borudan oluşan bir alıcı, destek sistemi, ısı transfer akışkanının sirkülasyonu için borulama sistemi, ısı transfer akışkanının sıcaklığını kolektöre girişte sabit tutabilmek için ısı değiştirici, ısı transfer akışkanı deposu, ısı transfer akışkanının kolektördeki sirkülasyonu yapabilmesi için pompa ve ölçüm ekipmanlarından (rotametre, ısı çiftleri, pironometre ve anemometre) oluşmaktadır.



1. Soğutucu su banyosu, 2. Isı transferi akışkanı deposu, 3. Pompa, 4. Çıkış sıcaklığı ısı çifti, 5. Giriş sıcaklığı ısı çifti, 6. Rotametre, 7. Alıcı, 8. Parabolik yansıtıcı yüzey, 9. Güneş ışınımını ölçen cihaz

Şekil 5.1. Deney düzeneği genel görünümü.

5.1.1. POTGÜK Alıcısı

Yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği üzere alıcı, soğurucu borudan ve cam zarftan oluşmaktadır. Isı transfer akışkanı soğurucu boru içinden geçmektedir. Soğurucu boru malzemesi olarak bakır seçilmiştir ve ısı iletim katsayısı 385 W/mK'dir. Soğurucu borunun soğuruculuk katsayısı (α_a) 0,9'dur [96]. Soğurucu borunun güneş ışınlarını soğurma kapasitesini artırmak için siyah mat boya ile boyanmıştır. Soğurucu borunun iç çapı 10 mm, dış çapı ise 13 mm'dir.

Soğurucu borunun dış kısmına eş merkezli Pyreks malzemesinden yapılmış cam zarf yerleştirilmiştir. Bu cam zarf ile taşınım ile olan ısı transfer kayıplarını azaltıp POTGÜK verimini arttırmak amaçlanmıştır. Bu amaçla, soğurucu boru ile cam zarf arasındaki bölge vakumlanmıştır. Cam zarfın iç çapı 26 mm, dış çapı 30 mm olarak imal edilmiştir. Pyreks malzemesinin termofiziksel ve optik özellikleri Çizelge 5.1'de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.1. Pyreks malzemesinin termofiziksel ve optik özellikleri [92].

Özellikler	Değerler
Yoğunluk (ρ)	2,23 g/cm ³
Işınım geçirgenliği (τ)	0,90
Özgül ısı (c_p)	750 J/kgK
Isı iletim katsayısı (k)	1,14 W/mK
Yayıcılık (ϵ_c)	0,9

5.1.2. Parabolik Yansıtıcı Yüzey

Parabolik yansıtıcı yüzey güneşten geçen ışınları alıcıya yansıtma görevini üstlenmektedir. Bu nedenle yansıtıcı yüzey malzemesinin yüksek yansıtıcılık özelliğine sahip olması gerekir. Deney düzeneğinde alüminyum sac metal kullanılmıştır ve yansıtıcılığı (ρ_{yy}) 0,69'dur [95]. Yansıtıcı yüzey kalınlığı 1 mm'dir.

5.1.3. Pompa

Sirkülasyon pompası deneysel çalışmalarda istenilen debi değerlerini sağlayacak şekilde seçilmiştir. Üç farklı hız ayarı bulunmaktadır. Deney sisteminde kullanılan Wilo KSL15/5-3 C model pompa Şekil 5.2'de gösterilmiştir ve çalışma akışkanının deney sistemi içerisindeki sirkülasyonu için kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan pompa.

5.1.4. Isı Değiştirici

Isı transfer akışkanının deney dűzeneđine sabit sıcaklıkta girişini sağlamak için bir ısı değiştirici kullanılmıştır. Isınmış olarak çıkan ısı transfer akışkanı bu ısı değiştirici içindeki bakır spirallerden geçerek şebeke suyu ile soğutma sağlanmıştır. şekil 5.3’de verilen ısı değiştirici kapasitesi 19 lt olup, çapı ve yűksekliđi sırasıyla 22 cm ve 50 cm’dir.



řekil 5.3. Isı deđiřtiricinin genel gűrűnűmű.

5.1.5. Sıcaklık lűmű

Isıl ift, iki farklı alaşımın ucunun kaynaklanması ile oluşturulan basit bir sıcaklık lű elemanıdır. Kaynak noktası sıcak nokta, diğer açık iki u soğuk nokta (veya referans noktası) olarak anılır. Isıl ift olayı sıcak nokta ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkından doğar. Bu sıcaklık farkına orantılı, soğuk nokta uçlarında mV mertebesinde gerilim űretilir. Bu gerilim bir veri kaydedici ile okunabilmektedir. Deney sisteminde alıcıya giren ve çıkan ısı transfer akışkanının sıcaklığını ölçmek için iki adet J tipi ısıl çift kullanılmıştır. Her bir ısıl çiftin kalibrasyonu, saf suyun donma ve kaynama

noktası esas alınarak elde edilmiştir. Çizelge 5.2’te J tipi ısı çiftlerinin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.2. J tipi ısı çift özellikleri.

Tip	Katot (-)	Anot (+)	Hassasiyet	Çalışma Aralığı (°C)
J	Konstantan	Demir (Fe)	±0,1 K	-200 – (+800)

5.1.6. Veri Kaydedici

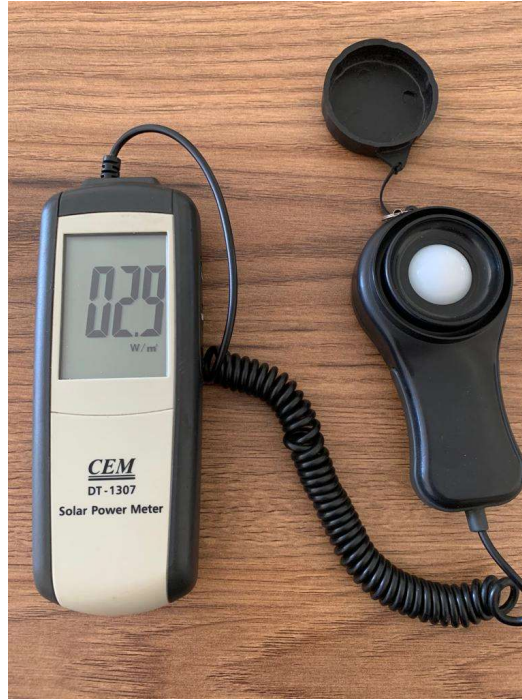
Veri kaydedici, ölçüm verilerini önceden belirlenen zaman aralığına göre kaydedebilen bir cihazdır. Geniş bir uygulama alanına sahiptir. Isıl çiftlerden alınan ölçümler yüksek doğrulukta okuma kabiliyetine sahip Şekil 5.4’te gösterilen sekiz ölçüm kanalına sahip Pico Teknoloji TC-08 isimli veri kaydedici cihaz ile okunarak kaydedilmiştir. Veri kaydedici, -270 °C ve +1820 °C sıcaklık aralığında çalışmaktadır. Sıcaklık ölçüm hassasiyeti ±0,5 °C’dir.



Şekil 5.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan veri kaydedicinin görünümü.

5.1.7. Güneş Işınımı Ölçümü

Güneş ışınımı Şekil 5.5'te verilen CEM DT-1307 isimli pironometre ile ölçülmüştür. Cihaz (-10)°C - (+60)°C sıcaklık aralığında çalışmaktadır. Ölçülebilen en yüksek güneş ışınımı 1999 W/m²'dir. Hassasiyeti ±10 W/m²'dir. Cihaz güneş kolektörü ile aynı eğim açısında yerleştirilerek ölçüm alınmıştır. Cihaza ait teknik özellikler Çizelge 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Pironometre.

Çizelge 5.3. Pironometre teknik özellikleri.

Boyut (mm)	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Hassasiyet ($\frac{W}{m^2}$)	Örnekleme Zamanı (sn)
162x63x28	-10-(+60)	±10	0,25

5.1.8. Rotametre

Deneyleerde akış hacimsel debisinin ölçümü için SLZS-15 marka plastik tüplü şamandıralı rotametre kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan rotametrenin genel görünümü Şekil 5.6'da sunulmuştur. Cihazın hassasiyeti %4'tür.



Şekil 5.6. Rotametre.

5.1.9. Isı Transfer Akışkanı Deposu

Isı transfer akışkanı deposu Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Çapı ve yüksekliği sırasıyla 15 cm ve 40 cm'dir. Yaklaşık 7 lt hacmindeki akışkana depo olarak görev yapmaktadır.



Şekil 5.7. Isı transfer akışkanı deposu.

5.2. NANOAKIŞKAN

5.2.1. Nanoakışkan Termofiziksel Özelliklerinin Bulunması

POTGÜK deney düzeneğinde ısı transfer akışkanı olarak %50-%50 dağılıma sahip etilen glikol-su (EG-H₂O) karışımı ve etilen glikol-su baz akışkanına çinko oksit (ZnO) nanopartikülü eklenerek elde edilmiş ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı kullanılmıştır. Çizelge 5.4'te 27 °C'deki EG-H₂O'nin ve ZnO'nun termofiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.4. EG-H₂O ve ZnO termofiziksel özellikleri [97] ve hesaplanan nanoakışkan özellikleri.

Tür	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (J/kgK)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)	Vizkosite (Pa s)
EG-H ₂ O	1054,80	3297,50	0,435	-
ZnO	5630,00	494,00	27,200	-
%1 ZnO/EG-H ₂ O	1100,55	3154,08	0,447	0,001589
%2 ZnO/EG-H ₂ O	1146,30	3147,75	0,460	0,002195
%3 ZnO/EG-H ₂ O	1192,06	3141,41	0,473	0,002919
%4 ZnO/EG-H ₂ O	1237,81	3135,08	0,486	0,003761

Nanoakışkanların ısı performanslarının belirlenmesi için termofiziksel özelliklerin belirlenmesi önem arz etmektedir. Yoğunluk, viskozite, özgül ısı ve ısı iletkenlik gibi özellikler güneş kolektöründeki akış rejimini belirlemek için kilit öneme sahiptir. ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının termofiziksel özellikleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilir.

Yoğunluk, Pak ve Cho tarafından geliştirilen model ile elde edilebilir [98]:

$$\rho_{eff} = \phi \rho_{np} + (1 - \phi) \rho_f \quad (5.1)$$

Özgül ısı, Xuan ve Roetzel modeli ile hesaplanabilir [99]:

$$(c_p)_{eff} = \frac{\phi(\rho c_p)_{np} + (1-\phi)(\rho c_p)_f}{\rho_{eff}} \quad (5.2)$$

Dinamik viskozite, aşağıdaki Pak ve Cho modeli ile bulunabilir [98,100]:

$$\mu_{eff} = (1 + 39,11\phi + 533,9\phi^2)\mu_f \quad (5.3)$$

Isı iletim katsayısı, Hamilton ve Crosser modeli ile saptanabilir [101]:

$$k_{eff} = k_f \frac{(k_{np} + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_{np})}{(k_{np} + 2k_f) + \phi(k_f - k_{np})} \quad (5.4)$$

Burada, eff , np , f ve ϕ sırasıyla efektif başka bir deyişle elde edilen nanoakışkanı, nanopartikülü, baz akışkanı (EG-H₂O) ve nanopartikül hacimsel oranı ifade etmektedir. Nanopartikül oranının artması ısı iletimliliği arttırmakla beraber viskoziteyi de arttırmaktadır. Viskozitenin artması kolektör verimliliğini etkileyen faktörlerden biridir. Nanoakışkan kullanımında, bu viskozite artışını başka bir deyişle nanopartikül hacimsel oranını kontrol etmek gerekir. Nanopartikül hacimsel oranının uygulamalar için optimum oranının belirlenmesi ile ilgili birçok çalışma vardır. Bu çalışmalara göre nanopartikül hacimsel oranının %5'in altında tutulduğu zaman ısı performansın arttığı, %5'in üzerinde ise azaldığı yönündedir [102–104]. Bu nedenle deneysel çalışmada ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının %1, %2, %3 ve %4 nanopartikül hacimsel oranları kullanılmıştır.

5.2.2. Nanoakışkan Hazırlanması

Nanoteknolojinin gelişimi ile birlikte ortalama partikül boyutu 100 nm'nin altında olan metalik veya metalik olmayan nanopartiküllerin üretimi sağlanmıştır. Nanopartiküllerin optik, mekanik, elektriksel, manyetik ve ısı özellikleri, iri taneli yapıları geleneksel malzemelerinkinden üstündür [105]. Nanopartiküllerin daha büyük yüzeyleri, daha az partikül momentumu ve yüksek hareket kabiliyetleri ile homojen

karışım kabiliyetleri nedeniyle yaygın bir uygulama alanına sahiptirler [106]. Nanopartiküllerin yüzey modifikasyonu, kararlı nanoakışkanlar elde etmek için en önemli faktördür. Kararlı nanoakışkan elde etmenin başlıca yolu yüzey aktif maddesi (surfaktan) kullanmaktır.

5.2.3. Yüzey Aktif Maddesi

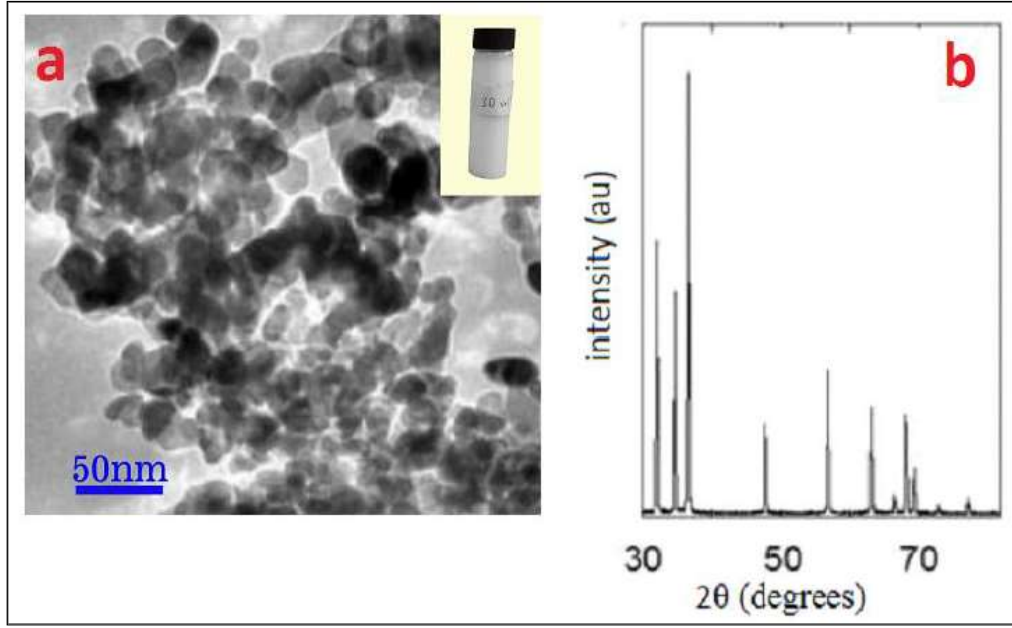
Yüzey aktif maddesi, su veya sulu çözeltinin yüzey gerilimini azaltan kimyasal bileşikler olarak tanımlanır [107,108]. Ayrıca iki akışkan arasındaki yüzey gerilimini de etkilerler. Yüzey aktif maddelerinin en önemli özellikleri, daha uzun süre hidrokarbon zincirlerine ve kendi kendilerine hareket edebilen polar gruplara sahip olmalarıdır [109,110]. Yüksek yoğunlukta, su gibi çözücülerde yüzey aktif maddesi çözücü yüzeylerde yayılma eğilimindedir. Bu yayılma etkisiyle çözücü ile yüzeyleri arasındaki bitişik faz arasındaki gerilim azalır ıslatma özellikleri değişir. Böylece karışım daha kolay homojen hale gelir [111]. Yüzey aktif maddeleri genellikle doğrusal bir yapı ile karakterize edilir ve doğrusal yapıya sahip yüzey aktif maddelerinin moleküllerinin uzunluğu genişliklerinden daha büyüktür [112,113].

Polivinilpirolidon (PVP), düşük moleküler ağırlıktan yüksek iyonik olmayan polimere kadar değişen çeşitli viskozite derecelerine sahip doğrusal bir polimerdir ve kimyasal formülü $(C_6H_9NO)_n$ 'dir [114]. Organik çözücülerdeki toksik olmayan yapı, ağırlık aralığı ve çözünürlük kapasitesi ile uygulamalarda PVP polimerine iyi bir esneklik sağlar. PVP polimeri ilaç endüstrisinden boya endüstrisine, kozmetik sektörden tekstil endüstrisine ve nanopartiküllerin yüzey kaplamalarına kadar kullanılmaktadır. PVP suda gayet iyi çözünür. PVP'nin çoğu organik çözücüde iyi çözünürlüğü, kimyasal kararlılığı ve hem hidrofobik (su itici/su sevmeyen) hem de hidrofilik (su tutan/su seven) malzemelerle benzerliği, nanopartiküllerin yüzeyini kaplayarak homojen bir yapı elde etmede önemli bir rol oynar [115–118]. Bu yüzey aktif maddesi (PVP), ZnO nanopartiküllerinin bahsedilen avantajlardan ve yoğunlukla nanoyapıların kararlılığı sağlayan kullanımından dolayı ve baz akışkanda (EG-H₂O) homojen bir dağılıma sahip kararlı bir yapıya sahip olmasını sağlamak için kullanılmıştır.

5.2.4. ZnO/EG-H₂O Nanoakışkanının Üretimi

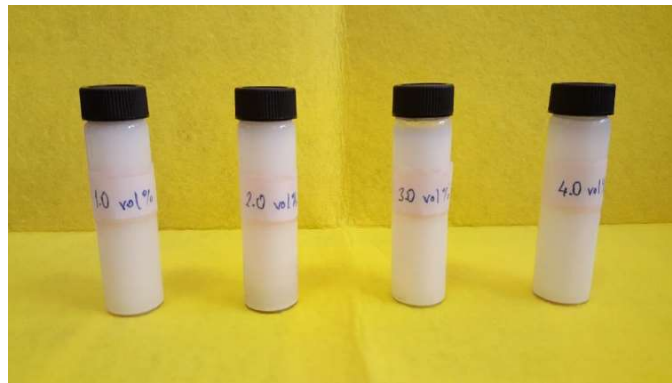
Nanoakışkanların üretiminde çoğunlukla kullanılan nanopartiküller arasında anti-toksik özelliği, yüksek geçirgenliği, yüksek elektriksel ve ısı iletkenliği sayesinde ZnO nanopartikülleri gelir [119]. Ayrıca, nano boyutlu ZnO'nun geniş yüzey alanı, katalitik reaksiyonlarda önemli bir avantaj sağlar. Bu nedenlerden dolayı POTGÜK deney sisteminde ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı kullanılmıştır.

ZnO nanopartikülleri Ege Nanotek Sanayi Ltd. Şti. firmasından alınmıştır ve ZnO'nun morfolojisi bir elektron mikroskopu olan Philips XL 30 S FEG (15 kV akselerasyon voltajı) ile kontrol edilmiştir. Karakterizasyon işlemi, Philips X'Pert Pro X-ışını difraktometresi (kırınımölçer) ile X-Işını Kırınımı (XRD) analizi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.8'de ZnO nanopartiküllerinin bir taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi ve XRD sonuçları gösterilmiştir. Şekil 5.8'deki SEM analizine göre nanopartiküller küreseldir ve ortalama nanopartikül boyutu yaklaşık 30 nm'dir. Ayrıca, XRD sonuçlarına göre 2θ 'nin pik değerlerinde başka bir deyişle $31,64^\circ$, $34,93^\circ$, $36,58^\circ$, $47,86^\circ$, $56,85^\circ$, $63,42^\circ$, $66,71^\circ$, $68,36^\circ$, $69,45^\circ$ ve $72,74^\circ$ 'de sırasıyla ZnO'nun altıgen (hegzagonal) vürztit yapısı olarak (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201) ve (004) atanmıştır. Bu pik noktalarının, Toz Kırınım Standartları Ortak Komitesi (JCPDS) kartı (No: 89-1397) ile iyi bir uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır. Pik noktalarının keskinliği ve güçlü yoğunlukları nanopartiküllerin kristalliğini ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 5.8. ZnO nanopartiküllerine ait (a) SEM ve (b) XRD görüntüsü.

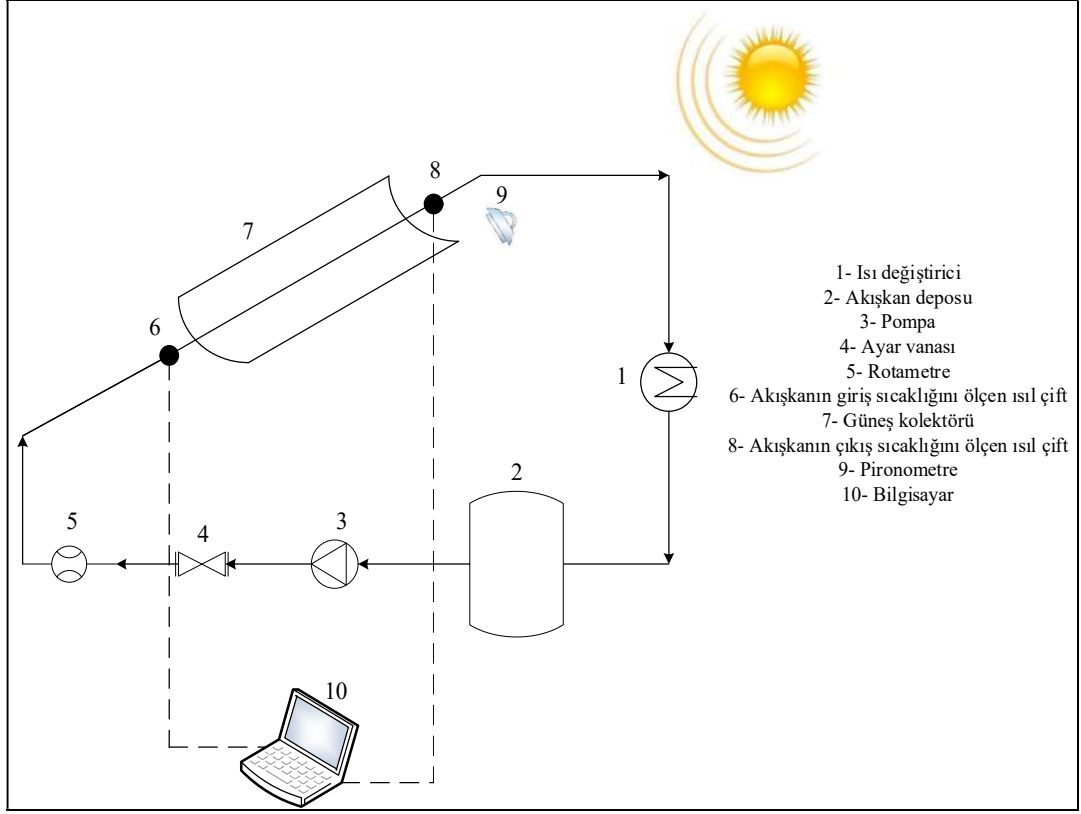
Baz akışkanı elde etmek için aynı orandaki (hacimce %50-%50) su ve etilen glikol akışkanları homojen bir karışım olana kadar karıştırılmıştır. Baz akışkan elde edildikten sonra ZnO nanopartikülleri baz akışkana eklenmiştir. PVP yüzey aktif maddesi, uzun vadeli kararlı nanoakışkan elde etmek için bir çözelti ajanı olarak kullanılmıştır. Daha sonra 12 saat manyetik karıştırma ve 4 saat salınımlı karıştırma işlemleri uygulanmıştır. %1, %2, %3 ve %4 nanopartikül hacimsel oranına sahip nanoakışkanlar elde edilmiştir. Şekil 5.9'dan görüldüğü üzere tüm ZnO/EG-H₂O nanoakışkanlarının numuneleri süt beyazı rengi gibi bir renge sahiptir.



Şekil 5.9. Farklı nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı numuneleri.

5.3. DENEYSSEL PROSEDÜR

Deneylede öncelikle, ısı transfer akışkanı depoya doldurulur. Pompanın da çalıştırılmasıyla beraber ısı transfer akışkanı deney sisteminde çevrimini gerçekleştirmeye başlar. Deney sistemi kapalı devre olarak çalışmaktadır. Pompadan hemen sonra yerleştirilen rotametre ısı transfer akışkanının hacimsel debisini ölçmektedir. Hacimsel debi, rotametreden önce yerleştirilmiş vana aracılığıyla ayarlanmaktadır. Debisi ayarlanan ısı transfer akışkanı güneş kolektörü girişine gelir. Alıcının güneş ışınlarını soğurmasıyla birlikte ısı transfer akışkanı ısınarak güneş kolektöründen çıkar. Daha sonra ısı transfer akışkanı ısı değiştiricinin bakır spiral borularında soğutulur. Soğuyan ısı transfer akışkanı ısı transfer akışkanı deposuna gelir. Böylece çevrim tamamlanmış olur ve bu şekilde deney süresi boyunca bu işlemler devam eder. Bu arada, verim hesabı yapabilmek için kolektöre giren ve çıkan ısı transfer akışkanının sıcaklıkları kayıt altına alınmaktadır. Aynı zamanda pironometre ile güneş ışınım şiddeti ölçülmektedir. Çalışmamızda farklı ısı transfer akışkanlarının verime etkisi araştırılacağı için ısı transfer akışkanlarının deney sisteminden boşaltılması gerekecektir. Boşaltma işlemi, ısı transfer akışkanın deposunun deney sistemindeki bağlantısı kesilerek tahliye vanasından pompa çalışır durumda gerçekleşir. Deneye ait şematik resim Şekil 5.10'da verilmiştir.



şekil 5.10. Deneye ait şematik gösterim.

5.4. DENEYSSEL HESAPLAMA

Yukarıda da ifade edildiği gibi POTGÜK'e ait faydalı enerji ve kolektör veriminin hesaplanması için rotametreden hacimsel debi, kolektör giriş ve çıkışına yerleştirilen ısıl çiftler aracılığı ile ısı transfer akışkanının giriş ve çıkış sıcaklıkları ve pironometre ile de güneş ışınım şiddeti ölçülmüştür. Yapılan ölçümler kullanılarak kolektör veriminin hesaplaması aşağıdaki eşitlikle elde edilmiştir.

Kolektör verimi ise [120]:

$$\eta_{ısıl,2} = \frac{\dot{Q}_k}{A_c \dot{G}_T} \quad (5.5)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $\dot{Q}_k = \dot{m}_{ITA} c_{p_{ITA}} (T_\zeta - T_g)$ [W/m²], A_c [m²] güneş kolektörü yüzey alanını, \dot{G}_T [W/m²] ise deneysel olarak ölçülen güneş ışınım şiddetini, T_ζ [°C] ve T_g [°C] deneysel olarak ölçülen sıcaklıkları ifade etmektedir.

5.5. BELİRSİZLİK ANALİZİ

Deneysel çalışmalarda hata sınırlarını belirlemek literatürde büyük önem taşımaktadır. Deneysel çalışmalarda belirsizlik test koşullarından, cihaz seçiminden, ortam koşullarından, okuma hatalarından kaynaklanabilir. Deneysel yapılan ölçümlerin doğruluğunu etkileyen en önemli faktör deneyler sırasında oluşabilecek hatalardır.

Belirsizlik analizi için Root-Sum-Square (RSM) yöntemi en güvenilir ve kabul edilebilir türdür. Sıcaklık, kütleli debi ve güneş ışınım şiddeti gibi parametrelerin belirsizlikleri bu yöntemle hesaplanmıştır. Holman [121] tarafından önerilen genel belirsizlik eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial w}{w} = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial x_i}{x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.6)$$

Burada, w herhangi ölçülen bir değeri, x_i ölçülen değerin minimum değerini, ∂x_i ölçüm cihazı doğruluğunu, $\frac{\partial x_i}{x_i}$ bağımsız parametre hatasını ifade etmektedir.

Kolektör verimi ($\eta_{isil} = \frac{\dot{m}_{ITA} c_{p_{ITA}} \Delta T}{A_c \dot{G}_T} = \frac{\rho \dot{V} c_{p_{ITA}} \Delta T}{A_c \dot{G}_T}$) için belirsizlik analizi yapılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{\partial \eta_{isil}}{\eta_{isil}} = \left[\left(\frac{\partial \rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{V}}{\dot{V}} \right)^2 + \left(\frac{\partial c_p}{c_p} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_c}{A_c} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{G}_T}{\dot{G}_T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.7)$$

Eş. (5.7)'de 6 bağımsız parametrenin belirsizlik değerleri sırasıyla %0,0, %0,05, %0,0, %0,869, %0,0 ve %1,095'dir. Yukarıda yoğunluğun, özgül ısının ve kolektör kesit alanının belirsizliklerinin sıfır çıkması ölçüm cihazlarının hassasiyetinin

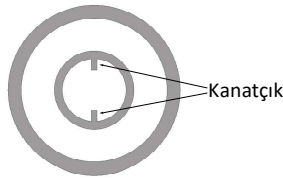
kullanılmamış olmasına dolayısıyla ihmal edilmiştir. Böylelikle, kolektör verimindeki belirsizlik değeri %1,4 olarak bulunur. Belirsizlik analizi hesaplamasına ait örnek hesaplama Ek Açıklamalar A'da verilmiştir.

BÖLÜM 6

SAYISAL ÇALIŞMA

Çalışmanın bu bölümünde sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmalarda deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği parametreler kullanılarak çözümlenmeler gerçekleştirilmiştir. Başka bir deyişle, sayısal çalışma dört farklı debide (20 lt/sa, 40 lt/sa, 60 lt/sa ve 80 lt/sa) ve beş farklı çalışma akışkanı (EG-H₂O baz akışkanı, %1 ZnO/EG-H₂O, %2 ZnO/EG-H₂O, %3 ZnO/EG-H₂O ve %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanları) kullanılarak yapılmıştır. Çalışmayı biraz daha detaylandırmak için hacimce eşit nanopartikül oranlarında (%50-%50) oluşturulmuş üç farklı hibrit nanoakışkan (Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O ve Ag-MgO/EG-H₂O) ve bunların %1, %2, %3 ve %4 nanopartikül hacimsel oranları ile çalışmalar sürdürülmüştür. Ayrıca, ısı transferi artırma yöntemi olarak kullanılan POTGÜK alıcısında bulunan soğurucu boru içerisine akış yönünde iki adet kanatçık yerleştirilmiştir. Bu şekilde, kanatçık yerleşiminin kolektör performansına etkisi belirlenmiştir. Çizelge 6.1’de sayısal analizde kullanılan parametreler sunulmuştur. Sayısal çalışmada toplam olarak 136 adet farklı analiz gerçekleştirilmiştir.

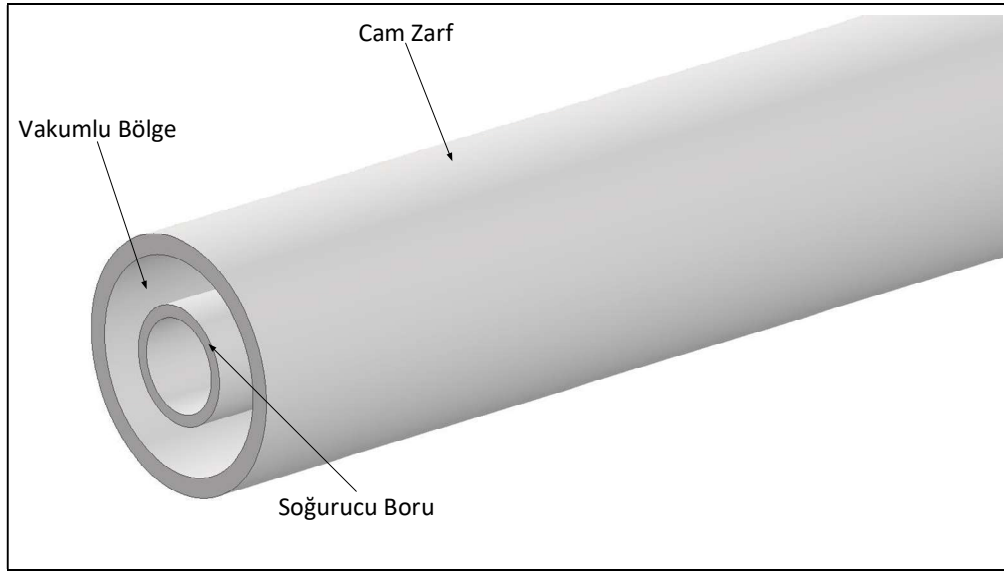
Çizelge 6.1. Sayısal çalışma parametreleri.

Isı transfer akışkanı	EG-H ₂ O, ZnO/EG-H ₂ O Ag-ZnO/EG-H ₂ O Ag-TiO ₂ /EG-H ₂ O Ag-MgO/EG-H ₂ O
Nanopartikül hacimsel oranı	%1, %2, %3, %4
Debi (lt/sa)	20, 40, 60, 80
Kanatçık	

6.1. FİZİKSEL MODEL

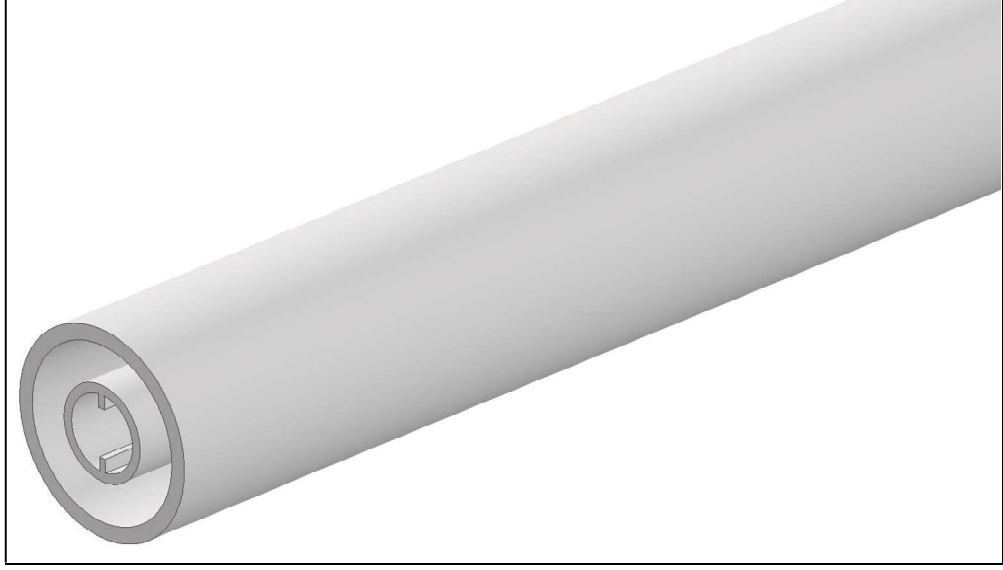
Sayısal çalışmada POTGÜK'ün sadece Şekil 6.1(a)'da gösterilen alıcı kısmı modellenmiştir. Alıcı geometrisinin boyutları deneysel çalışmadaki boyutların aynısı olarak alınmıştır. Ayrıca sayısal çalışmadaki incelenen parametreyi arttırmak amacıyla soğurucu boruya akış yönünde iki adet 0,5x1 mm boyutlarında dikdörtgensel kanatçık [Bkz. Şekil 6.1(b) ve (c)] eklenmiştir.

POTGÜK'te alıcı kısmı tüm sistemin performansının merkezinde yer alır. Bu nedenle, alıcının durumu tüm sistemin ısı performansını önemli ölçüde etkiler. Alıcının performansını artırmak için, alıcının ısı kaybını azaltan çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Bunlardan en önemlisi, soğurucu boru bir cam zarf ile çevrilir ve doğal konveksiyon ile gerçekleşen ısı kaybını azaltmak için cam zarf ile soğurucu boru arasında kalan alan çok düşük vakum basınçlarında tutulur.

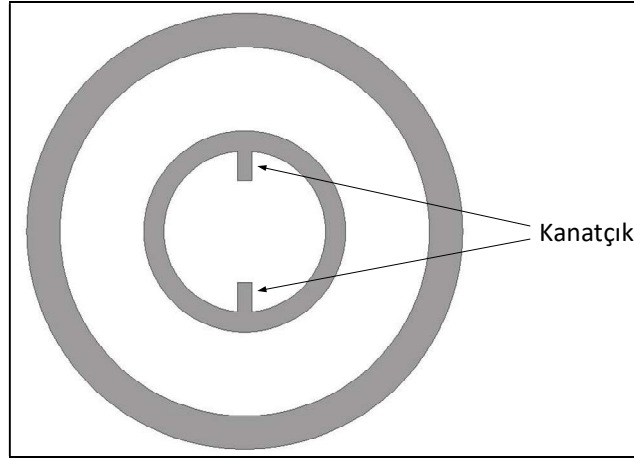


(a)

Şekil 6.1. Modellenen (a) kanatçıksız alıcı görünüşü (b) kanatçıklı alıcının izometrik görünüşü (c) kanatçıklı alıcının önden görünüşü.



(b)



(c)

Şekil 6.1. (devam ediyor).

6.2. TEMEL DENKLEMLER

Silindirik koordinatlarda, süreklilik, momentum ve enerji denklemleri iteratif olarak ANSYS Fluent R19 yazılımı tarafından çözülmüş ve gerekli sonuçlar elde edilmiştir [122].

Süreklilik denklemi:

$$\nabla \vec{V}^* = 0 \quad (6.1)$$

Momentum denklemi:

$$\left(\vec{V}^* \nabla^* \right) \vec{V}^* = Eu \nabla^* P^* + Re \nabla^{*2} \vec{V}^* \quad (6.2)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{1}{RePr} \nabla^{*2} T^* + \frac{E_c}{Re} \Phi^* = 0 \quad (6.3)$$

(6.1) - (6.3) eşitliklerindeki boyutsuz parametreler aşağıda ifade edilmiştir:

$$\vec{V}^* = \frac{\vec{V}}{U_m}, \quad \vec{V}^* = \vec{V} D_h, \quad Re = \frac{\rho V D_h}{\mu}, \quad P^* = \frac{P - P_\infty}{P_0 - P_\infty}, \quad g^* = \frac{g}{g}, \quad T^* = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty}, \quad Pr = \frac{\mu c_p}{k}, \quad E_c = \frac{U_m^2}{c_p (T_0 - T_m)},$$

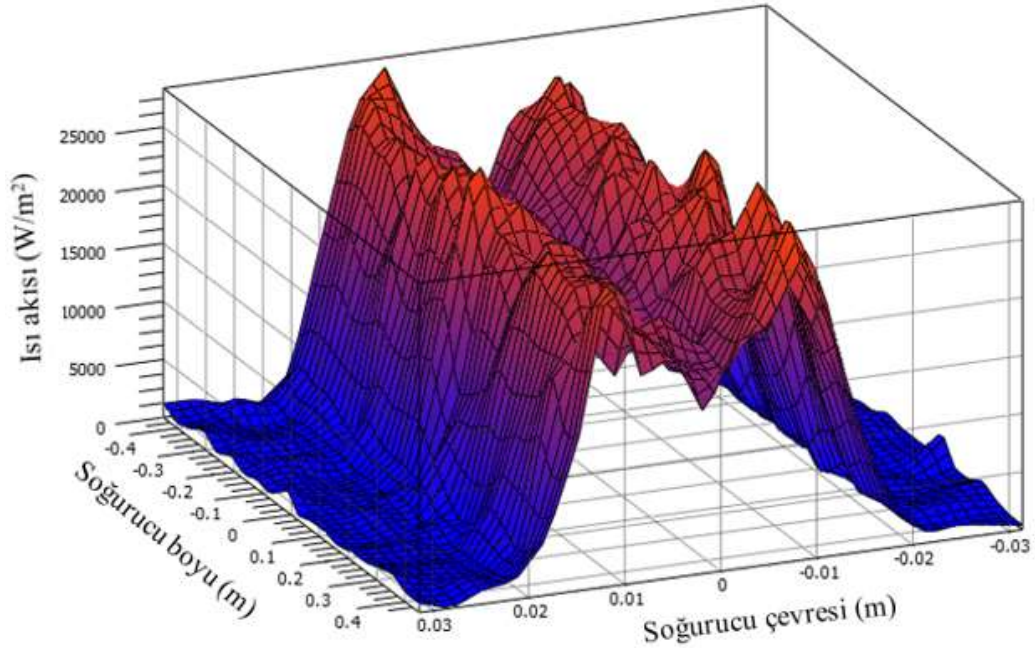
$$Eu = \frac{P_0 - P_\infty}{\rho V^2}$$

6.3. SINIR ŞARTLARI

6.3.1. Monte Carlo Işın İzleme Metodu (MCRT) ve Isı Akısı Sınır Şartı

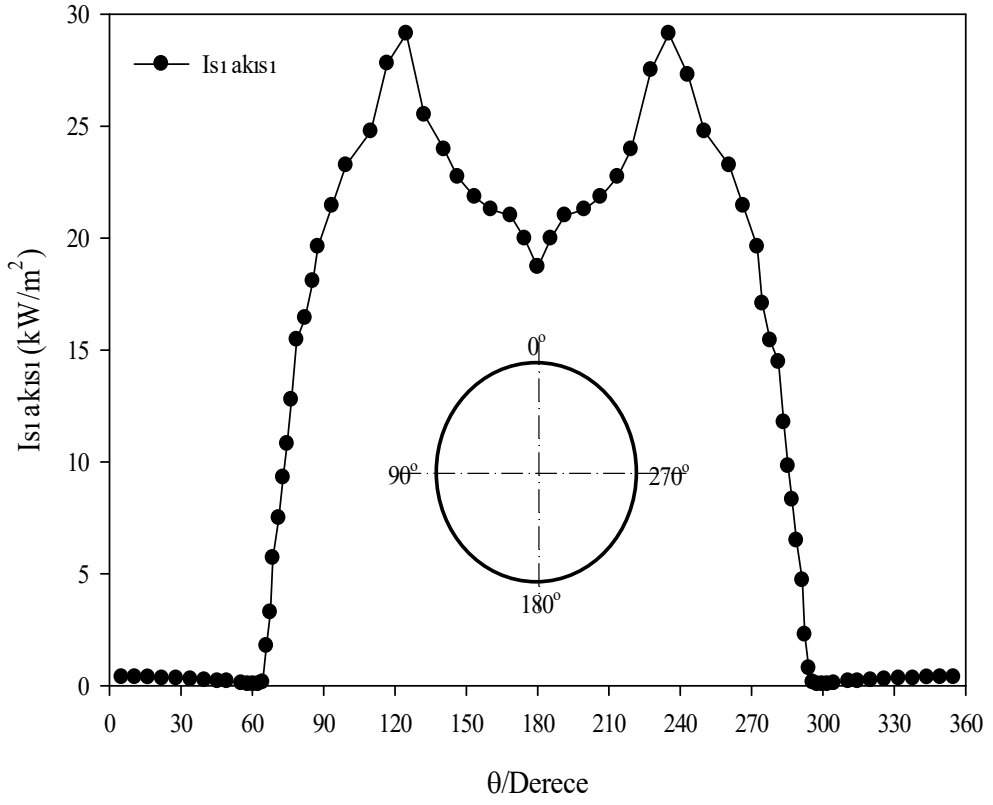
POTGÜK performansının sayısal olarak incelenmesinde en önemli parametrelerden biri de soğurucu boru üzerine düşen güneş ışınlarının modellenmesidir. Bilindiği üzere parabolik yansıtıcıdan soğurucu boruya yansıyan güneş ışınlarının şiddeti direkt alıcı üzerine düşen güneş ışınları şiddetinden çok daha fazladır. Bu nedenle parabolik yansıtıcı yüzeye bakan soğurucu borunun dış düzeyi diğer yüzeylerinden daha çok ısınır. Bu duruma bağlı olarak soğurucu boru yüzeyinde homojen olmayan ısı akısı dağılımı oluşur. İşte bu soğurucunun çevresi boyunca homojen olmayan ısı akısını elde etmek için açık kaynaklı ve ücretsiz olan SOLTRACE paket programı kullanılmaktadır. SOLTRACE, NREL tarafından geliştirilmiş yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemlerini optik olarak modelleyen ve analiz eden Monte Carlo Işın İzleme Metodu'nu kullanan bir programdır [123]. Sayısal çalışmada kullanılan 850 W/m²

direk güneş ışınımının SOLTRACE programında elde edilen soğurucu borunun çevresi boyunca homojen olmayan ısı akısı dağılımı Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

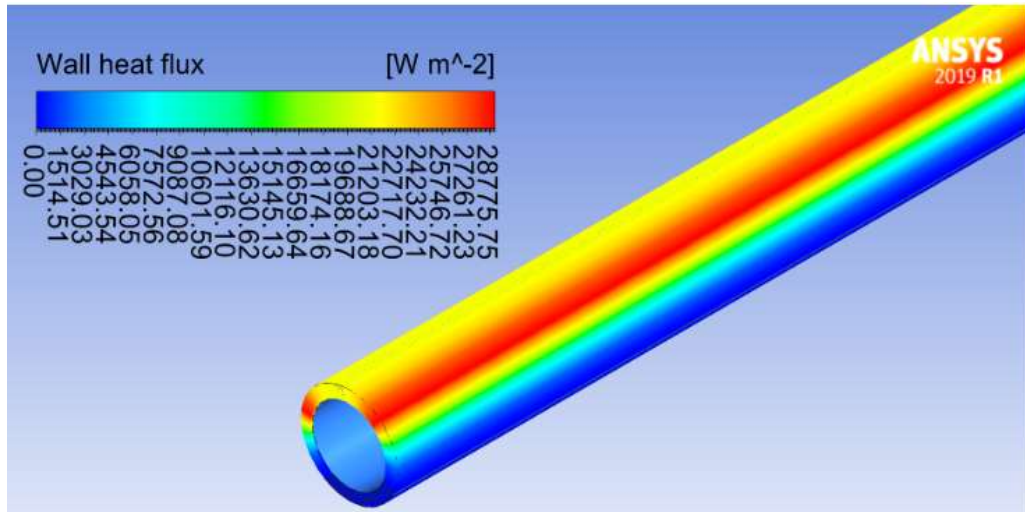


Şekil 6.2. SOLTRACE programında modellenen soğurucuya ait ısı akısı dağılımı.

Şekil 6.2’deki ısı akısı dağılımını ANSYS Fluent programına adapte etmek için ısı akısı dağılımı için eğri uydurma yöntemi kullanılmıştır. Eğri uydurma yöntemi ile elde edilen veriler ışığında ısı akısı dağılımının eğri denklemi bulunmuştur. Bulunan bu eğri denklemi C++ programlama dili ile kodlanmıştır. Kodlanan bu ısı akısı eğrisi denklemi Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon (UDF) ile ANSYS Fluent programına aktarılmıştır. Sayısal çalışmada kullanılacak olan ısı akısı sınır koşulunun grafik hali ve ANSYS Fluent programından elde edilen soğurucu boru üzerindeki ısı akısı dağılımı sırasıyla Şekil 6.3(a) ve 6.3(b)’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.3. (a) Isı akısı değişimi (b) soğurucunun üzerinde oluşan ısı akısı dağılımının Fluent'teki görünümü.

6.3.2. Diğer Sınır Şartları

- (a) Isı transfer akışkanı bölgesinde, giriş için uniform hız ve sıcaklık ($T_g=300$ K) sınır şartı uygulanmıştır.
- (b) Soğurucu boru çıkışında basınç, atmosfer basıncına eşit alınmıştır.
- (c) Bütün kanal duvarlarında kaymama sınır şartı uygulanmıştır.
- (d) Cam zarf ile soğurucu boru arasında kalan vakumlu bölgede basıncın düşük ve akışın olmaması nedeniyle taşınım ile ısı transferi gözardı edilip ışıyım ile ısı transferi mekanizması (S2S metodu ile gerçekleşen ışıyım ısı transferi) uygulanmıştır. Ayrıca bu bölgede bütün gradyanların sıfır olduğu simetri sınır şartı uygulanmıştır [124].
- (e) Cam zarfın dış yüzeyinde hem ışıyım ile hem de taşınım ile ısı transferi mevcuttur. Çevre ile cam zarf arasındaki taşınım ısı transfer katsayısı Eş. (6.4) ile bulunmuştur [124].

$$h_w = V_w^{0,58} d_{cdış}^{0,42} \quad (6.4)$$

Burada, V_w [m/s] rüzgâr hızını ve $d_{cdış}$ [m] cam zarf dış çapını ifade etmektedir. Ayrıca, rüzgâr hızı deneysel olarak ölçülen verilerin ortalaması olan $V_w=1,2$ [m/s] olarak alınmıştır.

6.4. HİBRİT NANOAKIŞKANLARIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BULUNMASI

Tek nanopartiküllü olan nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin bulunmasını sağlayan eşitlikler Bölüm 5.2’de verilmiştir. Sayısal çalışmada üzerinde performans analizi yapılan hibrit nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin hesaplanmasını sağlayan eşitlikler ise aşağıdaki gibidir.

Yoğunluk [98]:

$$\rho_{eff} = \phi \rho_{hnp} + (1-\phi) \rho_f \quad (6.5)$$

Isı sığası [125]:

$$(\rho c_p)_{eff} = \phi(\rho c_p)_{hnp} + (1-\phi)(\rho c_p)_f \quad (6.6)$$

Dinamik viskozite [98,100]:

$$\mu_{eff} = (1 + 39,11\phi + 533,9\phi^2)\mu_f \quad (6.7)$$

Isı iletkenlik katsayısı [126]:

$$k_{eff} = k_f \frac{(k_{hnp} + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_{hnp})}{(k_{hnp} + 2k_f) + \phi(k_f - k_{hnp})} \quad (6.8)$$

ρ_{hnp} , $c_{p_{hnp}}$, k_{hnp} ve ϕ aşağıdaki eşitliklerle bulunur [125]:

$$\rho_{hnp} = \frac{\rho_{p1}\phi_{p1} + \rho_{p2}\phi_{p2}}{\phi} \quad (6.9)$$

$$c_{p_{hnp}} = \frac{c_{p_{p1}}\phi_{p1} + c_{p_{p2}}\phi_{p2}}{\phi} \quad (6.10)$$

$$k_{hnp} = \frac{k_{p1}\phi_{p1} + k_{p2}\phi_{p2}}{\phi} \quad (6.11)$$

$$\phi = \phi_{p1} + \phi_{p2} \quad (6.12)$$

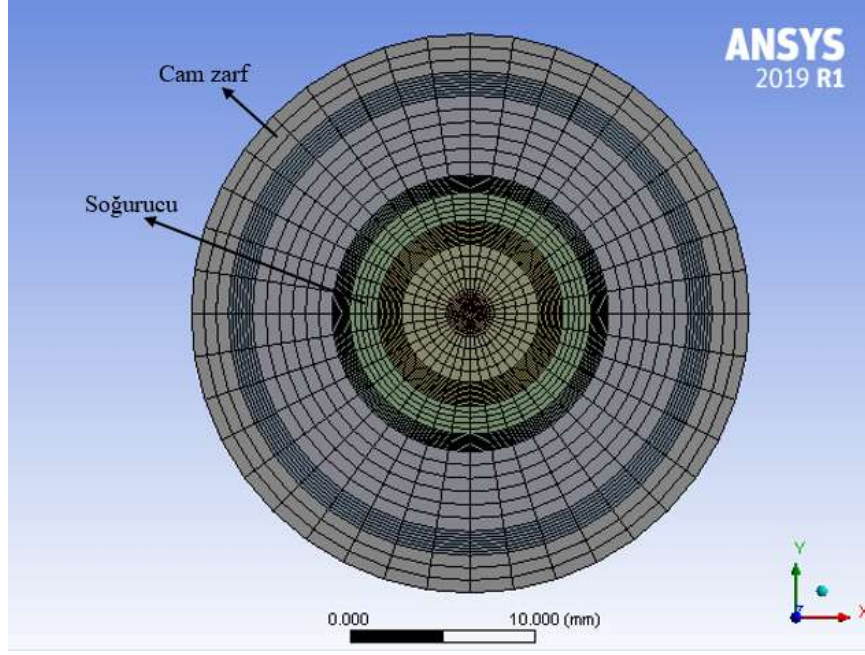
27 °C'deki nanopartiküllerin özellikleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Nanopartiküllerin özellikleri [71,127].

Tür	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (J/kgK)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
Ag	10500	236	426,77
ZnO	5630	494	27,196
TiO ₂	4250	686	8,786
MgO	3580	921	69,036

6.5. SAYISAL ÇÖZÜMLEME

Sınır koşulları ile birlikte temel denklem olan süreklilik, momentum ve enerji denklemleri çözülmüştür. Alıcı geometrisi ANSYS Design Modeler modülünde, Şekil 6.4'te gösterilen alıcının ağ yapısı ise ANSYS Meshing modülünde oluşturulmuştur. Temel denklemler ise ANSYS Fluent modülünde çözülmüştür. ANSYS Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanarak çözümleri yapmaktadır. Basınç-hız çiftinin çözümlenmesinde SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Temel denklemlerin ayrıklaştırılmasında ikinci dereceden upwind (second order upwind) şeması kullanılmıştır. Sayısal çalışmada farklı yakınsama değerleri için çözümler yapılmıştır ve çözümleri 10^{-6} yakınsama kriterinden sonra değişmediği saptanmıştır. Bu nedenle sayısal çalışmada yakınsama kriteri olarak 10^{-6} seçilmiştir. Aynı işlemler soğurucunun kanatçıklı durumunda da gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.4. Çözüm alanı ağ yapısı.

Sayısal çalışmada kullanılan ağ sayısı ile sonuçlar arasında kuvvetli bir bağ vardır. Genellikle ağ sayısının artmasıyla beraber çözümün doğruluğu da artmaktadır. Fakat ağ sayısının artması bilgisayarın işlem süresinin artması demektir ve zaman kaybına yol açabilir. Daha hızlı ve doğru sonuç almak adına optimum ağ sayısını belirlemek gerekmektedir. Sayısal çalışmalarda optimum ağ sayısının belirlenmesiyle sonuçların ağ sayısından bağımsızlığı sağlanır. Başka bir deyişle artan ağ sayısı ile sayısal sonuçların değişmemesini sağlamaktır. Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün ağ sayısı ile değişimi EG-H₂O akışkanının 80 lt/sa hacimsel debi değerinde Çizelge 6.3'te verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere 510 689 ağ sayısı optimum ağ sayısı olarak seçilmiştir. Optimum ağ sayısından büyük olan ağ sayılarında Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü değişim oranları çok azdır.

Çizelge 6.3. EG-H₂O akışkanının 80 lt/sa hacimsel debideki Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün ağ sayısı ile değişimi.

Ağ sayısı	Nusselt sayısı (<i>Nu</i>)	Değişim oranı (%)	Sürtünme faktörü (<i>f</i>)	Değişim oranı (%)
5687	38,8	-	0,02989	-
10365	29,3	24,48	0,02679	10,37
23025	25,8	11,94	0,02467	7,89
46365	23,5	8,91	0,02264	8,23
80256	21,7	7,65	0,02196	3,01
150327	21,0	3,22	0,02136	2,73
285369	20,5	2,38	0,02103	1,53
510689	20,2	1,46	0,02102	0,06
812369	20,1	0,49	0,02098	0,19
1103698	20,0	0,49	0,02062	1,68
1303584	20,1	0,50	0,02036	1,25

6.6. SAYISAL HESAPLAMALARDA KULLANILAN EŞİTLİKLER

Isı transfer akışkanı ile soğurucu boru arasındaki ısı taşınım katsayısı aşağıda verilen eşitlikle bulunur [128].

$$h = \frac{\dot{Q}_k}{A_{ao}(T_a - T_b)} = \frac{\dot{q}''}{(T_a - T_b)} \quad (6.13)$$

Burada \dot{Q}_k [W] faydalı enerjii, A_{ao} [m²] soğurucu boru dış yüzey alanını, T_a [K] soğurucu boru sıcaklığını ve $T_b = [(T_{ai}/T_{ao})/2]$ [K] ise akışkana ait ortalama sıcaklığı ifade eder. \dot{q}'' [W/m²] ise ısı akısını ifade eder.

Nusselt sayısı da aşağıdaki gibi hesaplanır [128]:

$$Nu = \frac{hd_{ic}}{k} \quad (6.14)$$

Soğurucu boru içindeki kritik Reynolds sayısı aşağıdaki gibi hesaplanır [128]:

$$Re_{kr}=140\left(\frac{8}{f}\right)^{0,5} \quad (6.15)$$

Isı transfer uygulamalarında, eğer $Re < Re_{kr}$ ise akış laminer kabul edilir. Yapılan bu sayısal çalışmaya göre akış rejimi laminerdir. Laminer akış şartlarında teorik olarak bulunan Nusselt sayısı (Nu_{teorik}) hesabı aşağıdaki formülle saptanabilir [128].

$$Nu_{teorik}=3,657+\frac{0,0668\left(\frac{d_{iç}}{L}RePr\right)}{1+0,04\left(\frac{d_{iç}}{L}RePr\right)^{2/3}} \quad (6.16)$$

Burada, $Pr=\frac{\mu c_p}{k}$ dır.

Yukarıdaki Nusselt sayısı formülü ısı olarak gelişmekte olan akışlar için kullanılmaktadır. Sayısal çalışmada bu formülün kullanılmasının uygun olup olmadığına karar vermek için ısı giriş uzunluğu ($L_r=0,05RePrd_{iç}$ [97]) hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucunda akışın ısı olarak gelişmekte olduğu bulunmuştur.

Sürtünme faktörü (f) aşağıdaki gibi hesaplanabilir [128]:

$$f=\frac{\Delta P}{\frac{L}{d_{iç}}\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)} \quad (6.17)$$

Burada, ΔP [Pa] basınç düşümünü, $V=\frac{\dot{m}}{\rho\frac{\pi}{4}(d_{iç})^2}$ [m/s] ise akışkan ortalama hızını temsil etmektedir.

Toplam entropi üretimi Eş. (6.18) ile elde edilir [129]:

$$\dot{S}_{gen_{toplam}}=\frac{(\dot{q}'')^2}{\pi k T_b^2 Nu}+\frac{8\dot{m}^3 f}{\pi^2 \rho^2 T_b (d_{iç})^5}=\dot{S}_{gen_{ısı}}+\dot{S}_{gen_{sürtünme}} \quad (6.18)$$

Eş. (6.18) ile sunulan entropi üretimi eşitliğinin ilk kısmı ısı transferinden kaynaklanan, ikinci kısmı ise sürtünmeden kaynaklanan entropi üretimini temsil etmektedir.

Isı transferinden kaynaklanan entropi üretiminin üzerindeki sürtünmeden kaynaklanan entropi üretiminin baskınlığını ortaya koyan Bejan sayısı ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir [130]:

$$Be = \frac{\dot{S}_{gen_{ISI}}}{\dot{S}_{gen_{ISI}} + \dot{S}_{gen_{sürtünme}}} \quad (6.19)$$

BÖLÜM 7

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, farklı ısı transfer akışkanları (nanoakışkan ve hibrit nanoakışkan) ile farklı nanopartikül hacimsel oranlar, hacimsel debiler ve güneş ışınım şiddeti gibi kolektör verimini etkileyen parametreler dikkate alınarak, POTGÜK'ün verimliliğindeki değişimi araştırmak için deneysel ve sayısal analizler yapılmıştır.

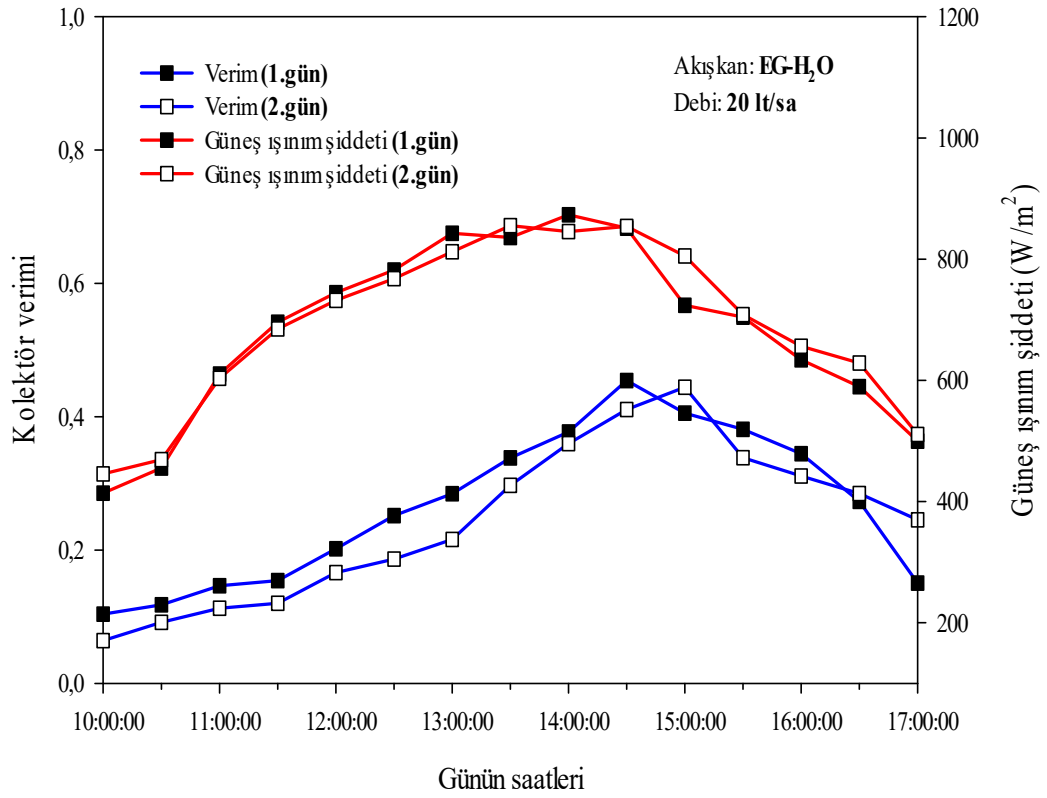
7.1. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde, POTGÜK'e ait verimin deneysel incelenmesi sunulmuştur. POTGÜK verimi hesaplanırken ısı transfer akışkanının giriş ve çıkış sıcaklıkları, hacimsel debi, rüzgâr hızı, çevre sıcaklığı ve güneş ışınım şiddeti ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Deneysel çalışmalar 1 Mayıs 2021-1 Temmuz 2021 tarihleri arasında günün 10.00-17.00 saatleri arasında her 30 dakikada bir ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Toplam 40 adet deneysel veri alınmıştır. Ayrıca, ASHRAE 93-1986 standardı göz önüne alınmıştır. POTGÜK üzerinde nanoakışkanın etkisinin incelemek için hacimce %50-%50 olan EG-H₂O baz akışkanının içerisine %1, %2, %3 ve %4 nanopartikül hacimsel oranında ZnO nanopartikülleri eklenmiştir.

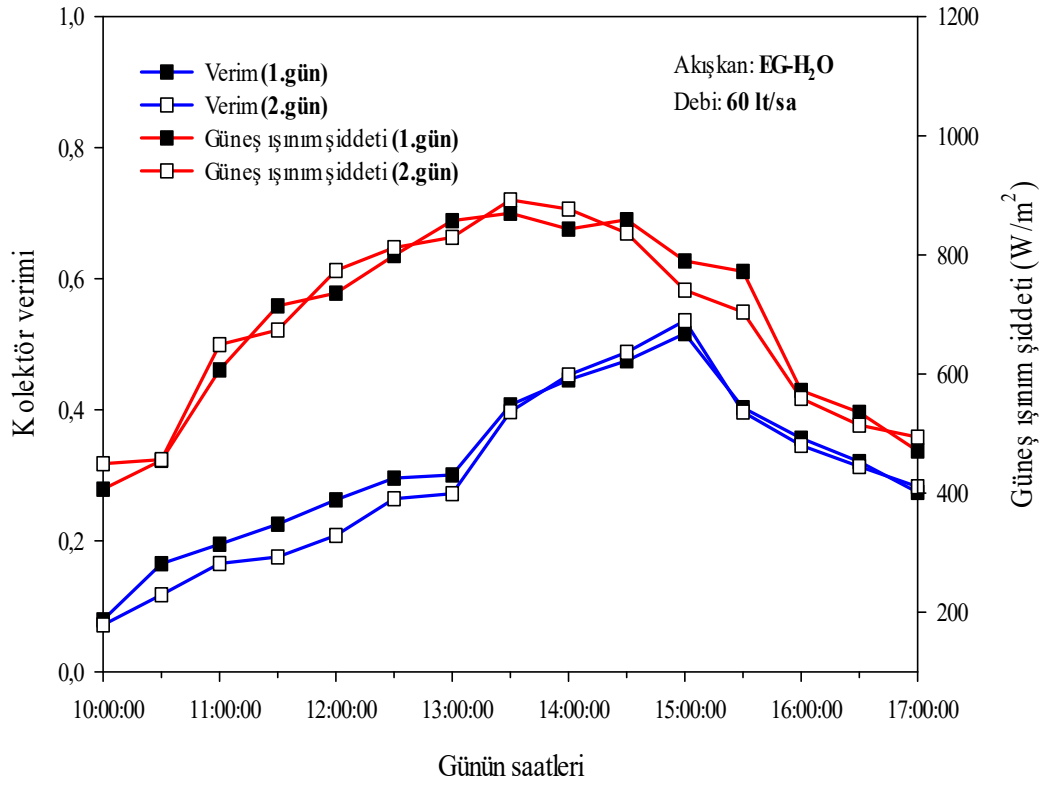
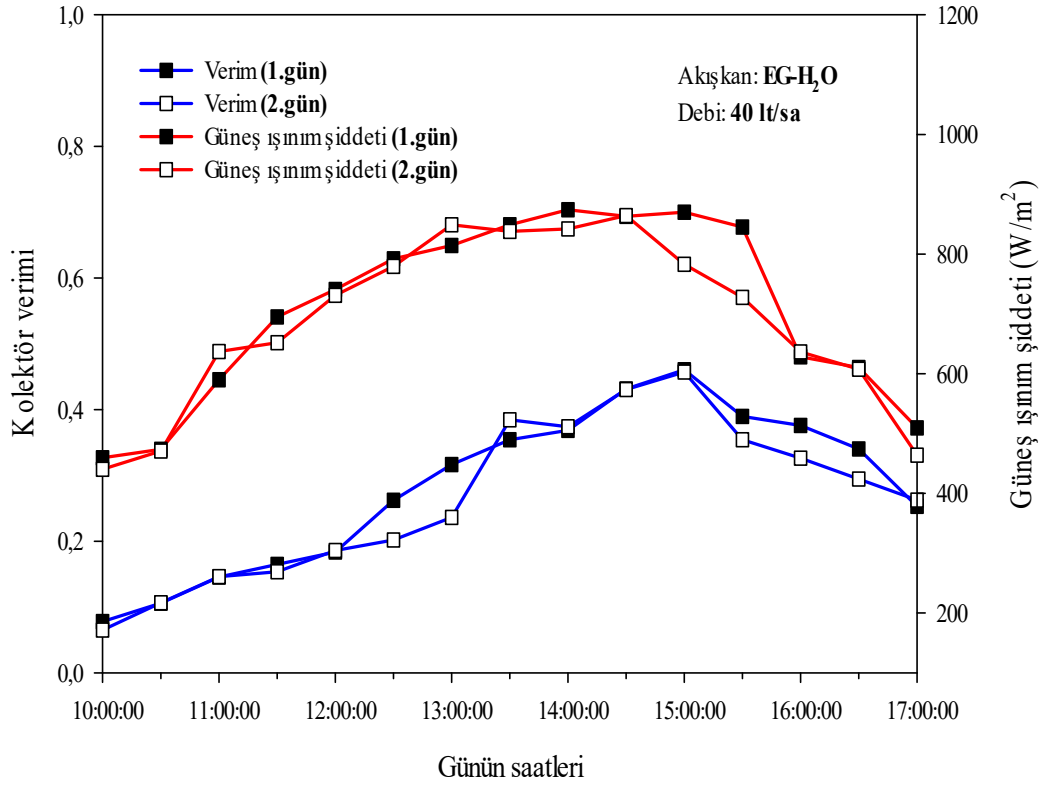
7.1.1. Kolektör Verimi ve Güneş Işınım Şiddetinin Zamanla Değişimi

Güneş ışınım şiddeti zamana bağlı bir parametredir. Kolektör verimi için çok önemli olan ışınım şiddetinin gün içerisindeki değişiminin kayıt altına alınması gerekir. Bu nedenle sunulan Şekil 7.1, EG-H₂O ısı transfer akışkanının kullanıldığı durumda 20 lt/sa, 40 lt/sa, 60 lt/sa ve 80 lt/sa hacimsel debilerindeki kolektör veriminin ve güneş ışınım şiddetinin gün içerisindeki değişimini göstermektedir. Deney düzeneğinin tekrarlanabilirliğini test etmek için aynı ısı transfer akışkanı ve aynı hacimsel debi için 2 gün deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kolektör verimleri 1. ve 2.

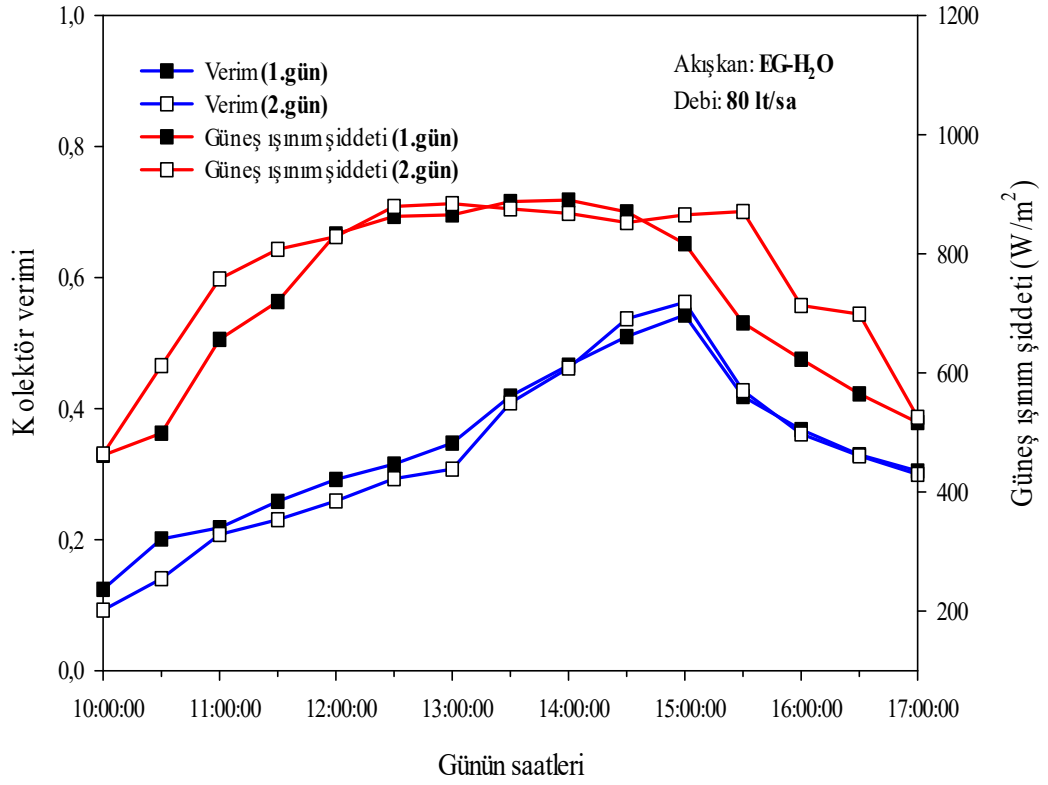
günde yaklaşık aynı değerler olarak ölçülmüştür. Şekillerden görüldüğü üzere güneş ışınım şiddeti günün 13.00-14.00 saatleri arasında en yüksek değerlerini almaktadır. Bunun nedeni olarak günün bu saatlerinde güneş ışınlarının daha dik gelmesi olarak gösterilebilir. Kolektör verimi ise güneş ışınım şiddetinin değişim karakteristiğine uygun olarak sabah saatlerinden öğle saatlerine kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan diğer ısı transfer akışkanları için kolektör verimi ve güneş ışınım şiddeti değerleri Ek Açıklamalar B’de verilmiştir.



Şekil 7.1. Kolektör veriminin ve güneş ışınım şiddetinin farklı günlerde ve hacimsel debilerde değişimi.



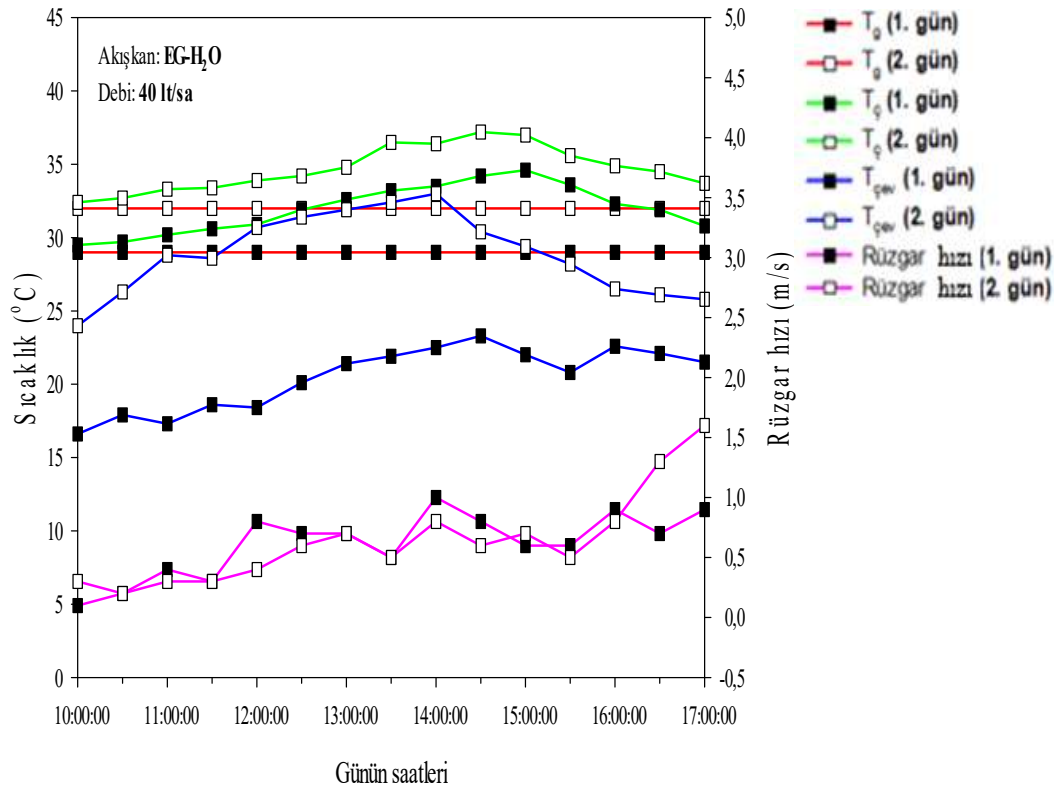
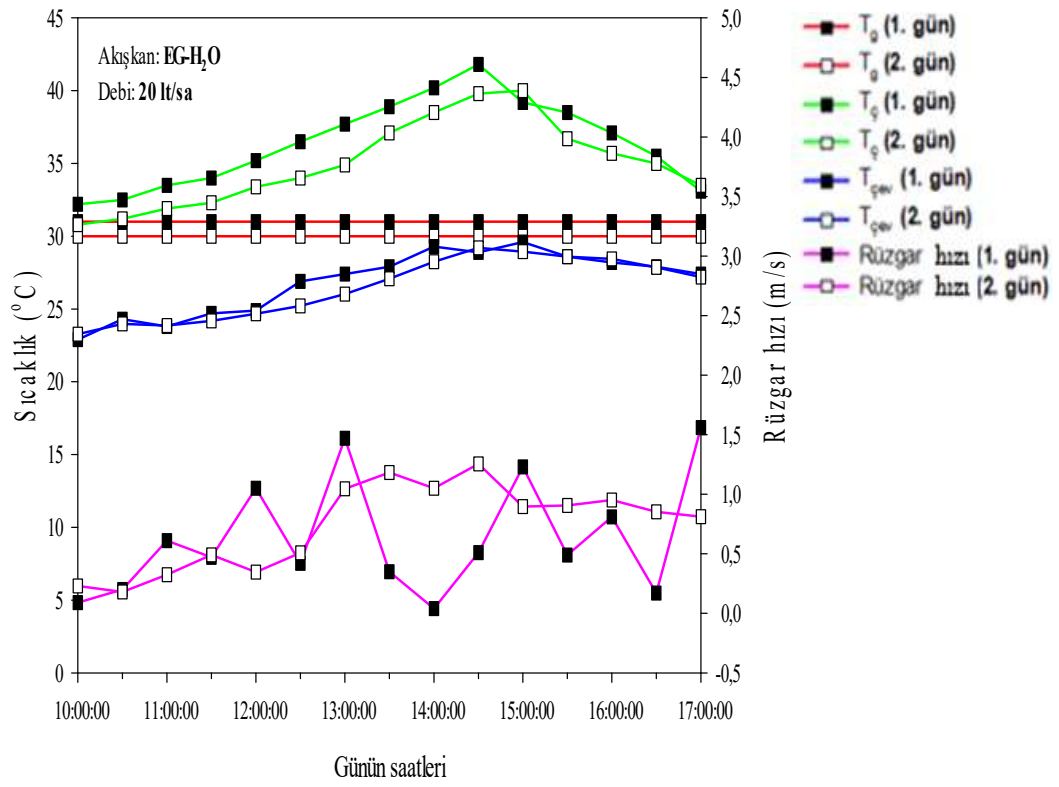
Şekil 7.1. (devam ediyor).



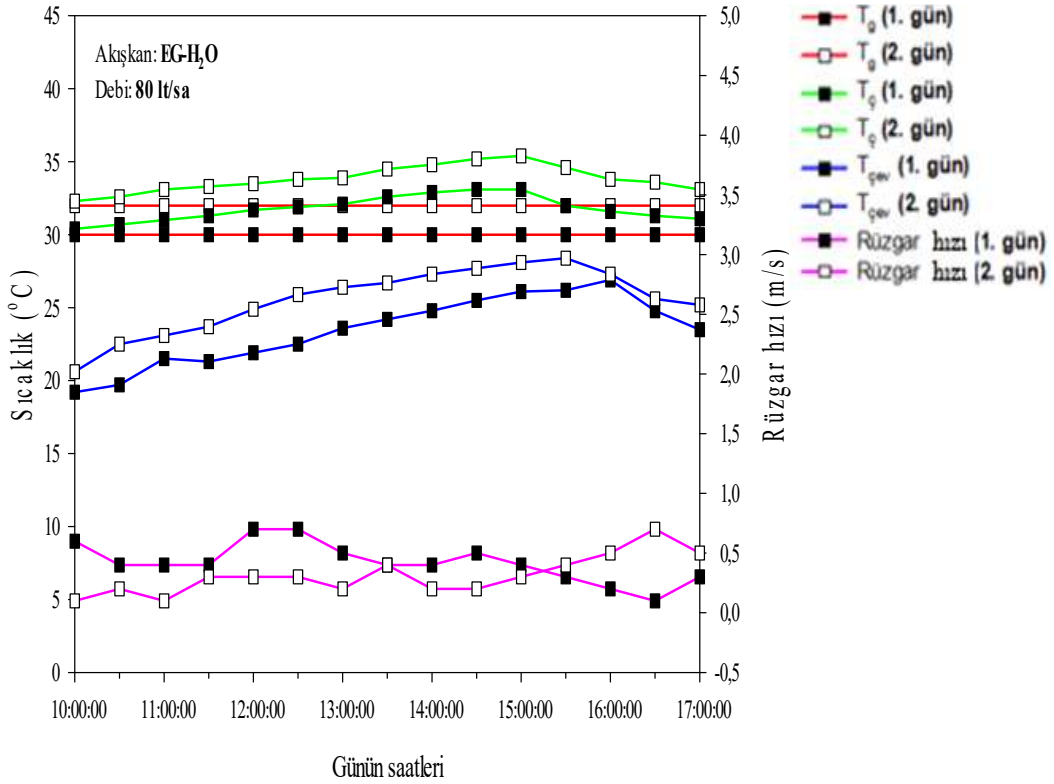
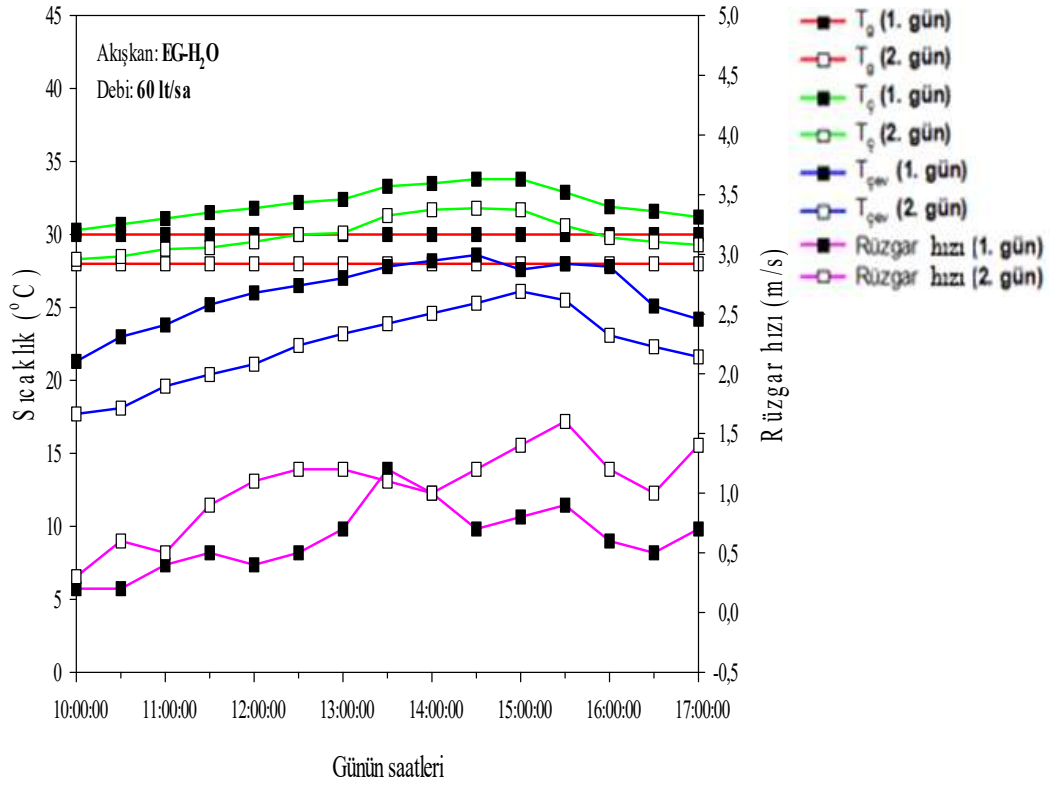
Şekil 7.1. (devam ediyor).

7.1.2. Sıcaklıkların ve Rüzgâr Hızının Zamanla Değişimi

Şekil 7.2, farklı hacimsel debilerde çalışma akışkanı olarak EG-H₂O kullanılan duruma ait giriş ve çıkış sıcaklıklarının, çevre sıcaklığının ve rüzgâr hızının gün içerisindeki değişimini göstermektedir. Rüzgâr hızı anemometre ile ölçülmüştür. Kolektör veriminin doğruluğunu arttırmak için çalışma akışkanının sıcaklığı sabit tutulmuştur. Farklı günlerde çevre sıcaklığına göre akışkan giriş sıcaklıkları değişme göstermektedir. Grafiklerden fark edileceği gibi çevre sıcaklığı ve çalışma akışkanının çıkış sıcaklığı deneyin başlangıcından itibaren öğle saatlerine kadar artış eğilimindedir. Rüzgâr hızı ise günün değişen saatlerinde inişli-çıkışlı bir eğilim göstermektedir. Deneysel çalışmada kullanılan diğer çalışma akışkanları için sıcaklık ve rüzgâr hızı değişimleri Ek Açıklamalar B'de verilmiştir.



Şekil 7.2. Sıcaklık ve rüzgar hızının farklı günlerde ve hacimsel debilerde değişimi.



Şekil 7.2. (devam ediyor).

7.1.3. POTGÜK'e Ait Ortalama Faydalı Enerji ve Verimin Karşılaştırılması

POTGÜK'e ait faydalı enerji ve verim hesaplamaları analitik olarak elde edilen eşitlik ve literatürde deneysel olarak yapılan çalışmalarda kullanılan eşitlik olmak üzere iki farklı eşitlik kullanılarak elde edilmiştir. Deneyin yapıldığı bütün akışkanlar için faydalı enerji hesaplamasında Eş. (4.36) ve (4.22) kullanılmıştır. Kolektör veriminin hesaplamasında ise Eş. (4.40) ve Eş. (5.5) kullanılmıştır. Bu hesaplamalara ilişkin faydalı enerji, verim değerleri ve fark oranları Çizelge 7.1'de verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere farklı eşitliklerden elde edilen faydalı enerji ve verim değerleri birbirine çok yakındır. Buna bağlı olarak da fark oranı çok düşüktür. Ek Açıklamalar C'de bu hesaplamaların elde edilmeleri ile ilgili örnek bir hesaplama verilmiştir.

Çizelge 7.1. Farklı eşitliklerle faydalı enerji ve verimin karşılaştırılması.

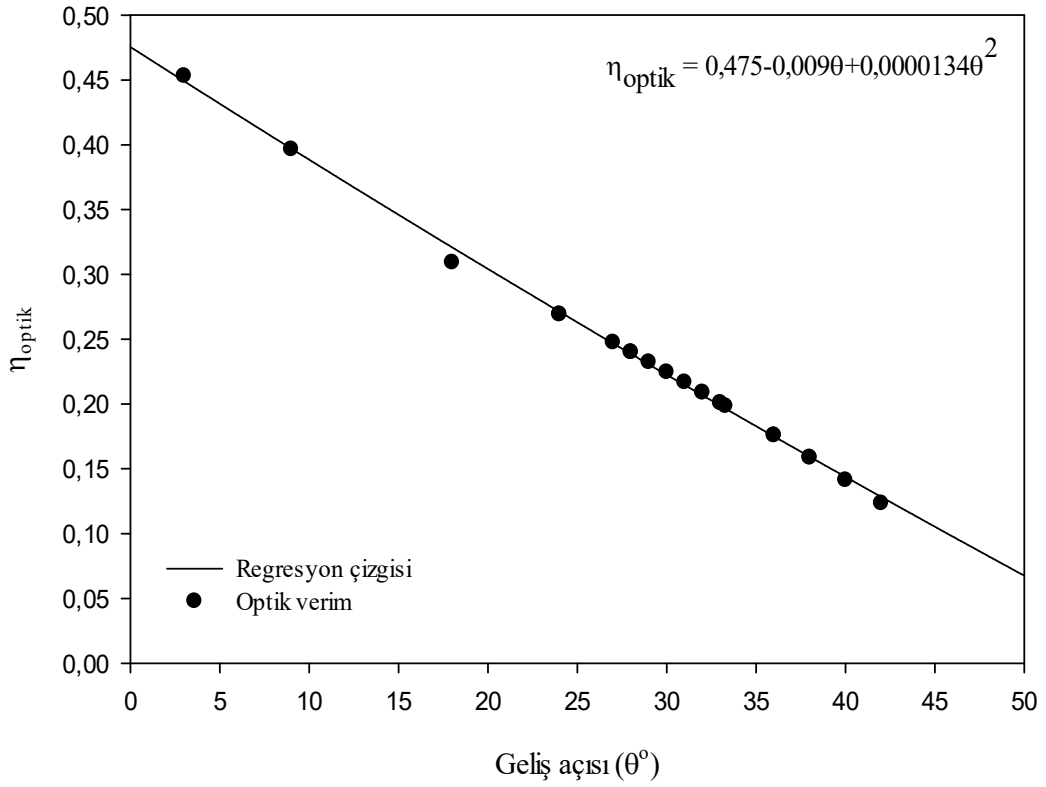
Akışkan	Debi (lt/sa)	Güneş Işınımı (W/m ²)	Faydalı Enerji (W) (Eş. 4.36)	Faydalı Enerji (W) (Eş. 4.22)	Fark (%)	Verim (Eş. 4.40)	Verim (Eş. 5.5)	Fark (%)
EG-H ₂ O	20	692,0	96,57	96,35	0,23	0,258	0,254	1,74
	40	688,2	103,73	104,34	0,59	0,279	0,273	2,24
	60	684,2	116,68	116,71	0,02	0,316	0,309	2,20
	80	716,8	136,28	138,09	1,31	0,352	0,348	1,17
%1 ZnO/EG-H ₂ O	20	695,9	109,46	109,79	0,30	0,291	0,286	1,84
	40	677,3	122,78	121,62	0,95	0,336	0,331	1,41
	60	697,1	130,28	130,36	0,06	0,346	0,341	1,50
	80	585,3	119,66	121,87	1,81	0,379	0,372	1,77
%2 ZnO/EG-H ₂ O	20	686,0	114,18	111,86	2,07	0,308	0,303	1,73
	40	742,6	135,09	138,18	2,24	0,337	0,331	1,78
	60	729,3	142,70	144,47	1,22	0,362	0,358	1,21
	80	762,8	159,10	162,84	2,30	0,386	0,382	1,10
%3 ZnO/EG-H ₂ O	20	670,6	116,48	114,76	1,50	0,294	0,30	2,14
	40	654,8	124,49	127,45	2,32	0,352	0,348	1,17
	60	687,6	140,05	142,72	1,86	0,377	0,369	2,22
	80	734,7	161,63	165,67	2,44	0,407	0,403	1,09
%4 ZnO/EG-H ₂ O	20	700,8	125,38	128,67	2,55	0,331	0,326	1,63
	40	718,4	143,02	146,46	2,35	0,369	0,362	1,84
	60	692,4	152,09	155,17	1,98	0,407	0,397	2,46
	80	743,6	179,49	181,29	0,99	0,447	0,437	2,29

7.1.4. POTGÜK'e Ait Optik Verim

Teorik olarak yansıtıcı yüzeyden yansıyan güneş ışınları soğurucu boru tarafından emilebilir. Fakat cam zarfın geçirgenliği, soğurucu borunun soğurma kabiliyet katsayısı, yansıtıcı yüzeyin yansıtıcılık katsayısı gibi etmenler gerçek hayatta güneş ışınlarının soğurucu boru tarafından tam emilmesini engeller ve optik verimin düşmesine neden olurlar.

Kolektör verimini etkileyen parametrelerden biri de optik verimdir. Optik verim kolektör malzemelerinin özelliklerine, kolektör geometrisine, güneş ışınlarının geliş açısına (θ) ve kesişme faktörüne (γ) bağlıdır [131].

Şekil 7.3'te deneyde kullanılan POTGÜK'e ait optik verimin geliş açısına bağlı olarak değişimi sunulmaktadır. Optik verim Eş. (4.32) kullanılarak elde edilmiştir. Optik verim hesabı için Eş. (4.32)'de görülen geliş açısı ve kesişme faktörünün hesaplanması gerekmektedir. Geliş açısının hesaplanmasında Eş. (2.8) kullanılmıştır. Eş. (2.8)'deki bilinmeyenler ise Eş. (2.1)-Eş. (2.7) arasındaki ifadeler kullanılarak hesaplanmıştır. Şekilde görüldüğü üzere geliş açısının artmasıyla beraber optik verim azalmaktadır [94,132]. Optik verimin azalması da kolektör verimin de azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca optik verimin geliş açısına bağlı olarak değişen bir korelasyonu da grafik üzerinde sunulmuştur.



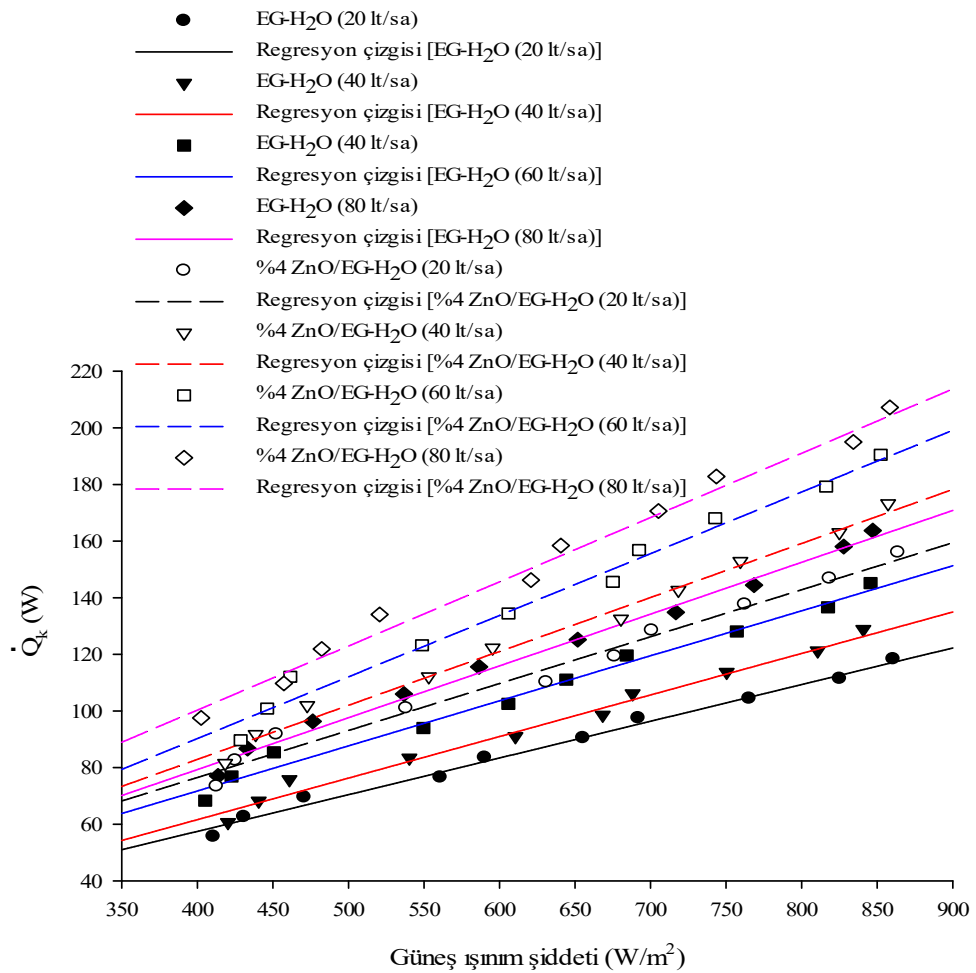
Şekil 7.3. POTGÜK'e ait optik verimin geliş açısı ile değişimi.

7.1.5. Faydalı Enerjinin (\dot{Q}_k) Güneş Işınım Şiddeti ile Değişimi

Şekil 7.4(a) kolektördeki ortalama faydalı enerjinin güneş ışınım şiddetine bağlı olarak EG-H₂O ve %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı için farklı debilerdeki değişimini sunmaktadır. İlk olarak aynı ısı transfer akışkanı için hacimsel debinin artmasıyla birlikte faydalı enerjinin, güneş ışınım şiddetinin artışıyla artış gösterdiği fark edilebilir. En yüksek faydalı enerji %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının 80 lt/sa'lik hacimsel debisinde elde edilmektedir. Maksimum faydalı enerji yaklaşık olarak 200 W olup bu değer baz akışkan olan EG-H₂O'nun 20 lt/sa ve 80 lt/sa'lik debilerindeki aynı şartlardaki değerlerinden %150 ve %73,9 daha fazladır. Bunun nedeni olarak baz akışkana nanopartikül eklenmesiyle birlikte nanoakışkanın ısı direnci düşerken ısı iletim katsayısının artmasına bağlı ısı transfer katsayısının artması gösterilebilir [133].

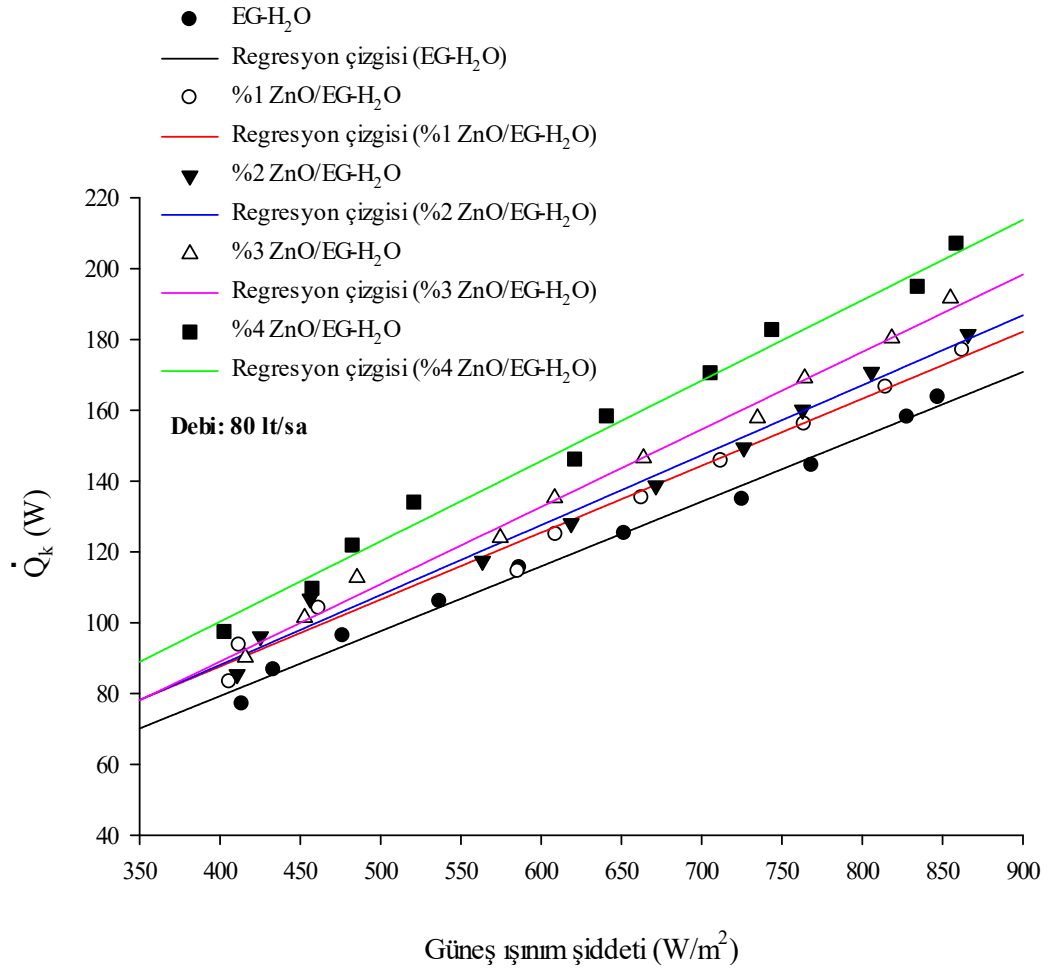
Şekil 7.4(b) ise, sabit 80 lt/sa'lik hacimsel debide farklı nanopartikül hacimsel oranlarında oluşturulmuş ZnO/EG-H₂O nanoakışkan kullanımının faydalı enerjiye etkisini gösteren bir grafikdir. Baz akışkana artan nanopartikül hacimsel oranında

nanopartikül eklenmesiyle faydalı enerji miktarı artmaktadır. Bunun nedeni ise baz akışkana göre daha kısa dalga boylu olan nanopartiküllerin eklenmesiyle daha yüksek enerji soğurma kapasiteli nanoakışkanlar elde etmek olarak açıklanabilir [133]. Güneş ışınım şiddetinin artmasına bağlı olarak bütün ısı transfer akışkanlarında faydalı enerji miktarı artmaktadır. 850 W/m^2 güneş ışınım şiddetinde, %1, %2, %3 ve %4 nanopartikül hacimsel oranlı nanoakışkan kullanımıyla faydalı enerji baz akışkan kullanılan duruma göre sırasıyla yaklaşık olarak %30, %43, %56 ve %73 oranlarında daha fazladır.



(a)

Şekil 7.4. (a) Faydalı enerjinin farklı hacimsel debilerde EG-H₂O ve %4 ZnO/EG-H₂O akışkanları için değişimi, (b) faydalı enerjinin ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı için farklı nanopartikül hacimsel oranları ile değişimi.



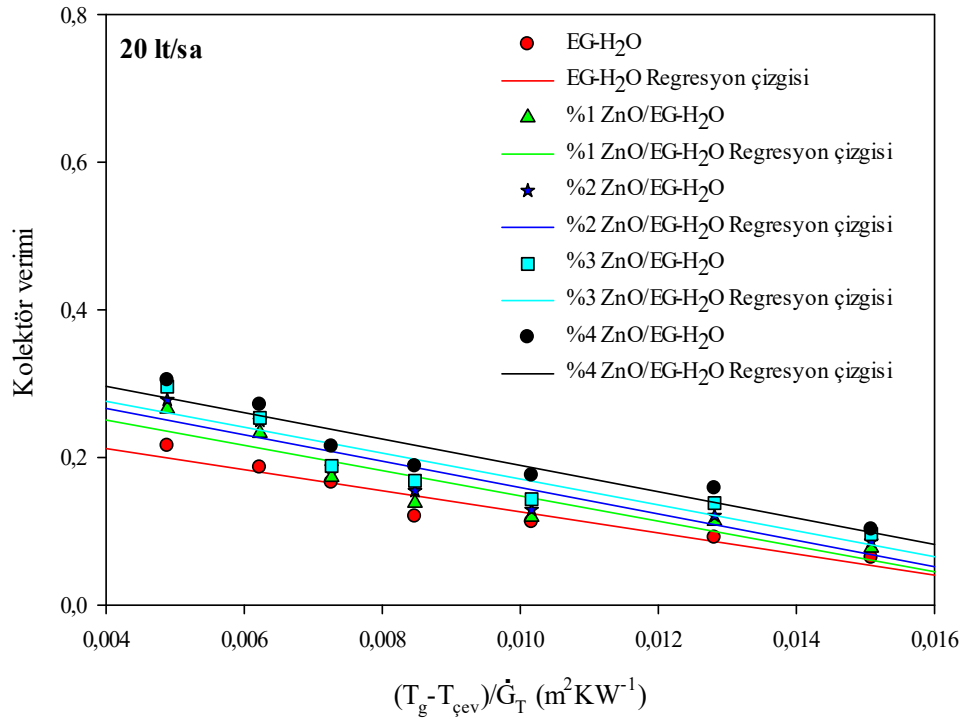
(b)

Şekil 7.4. (devam ediyor).

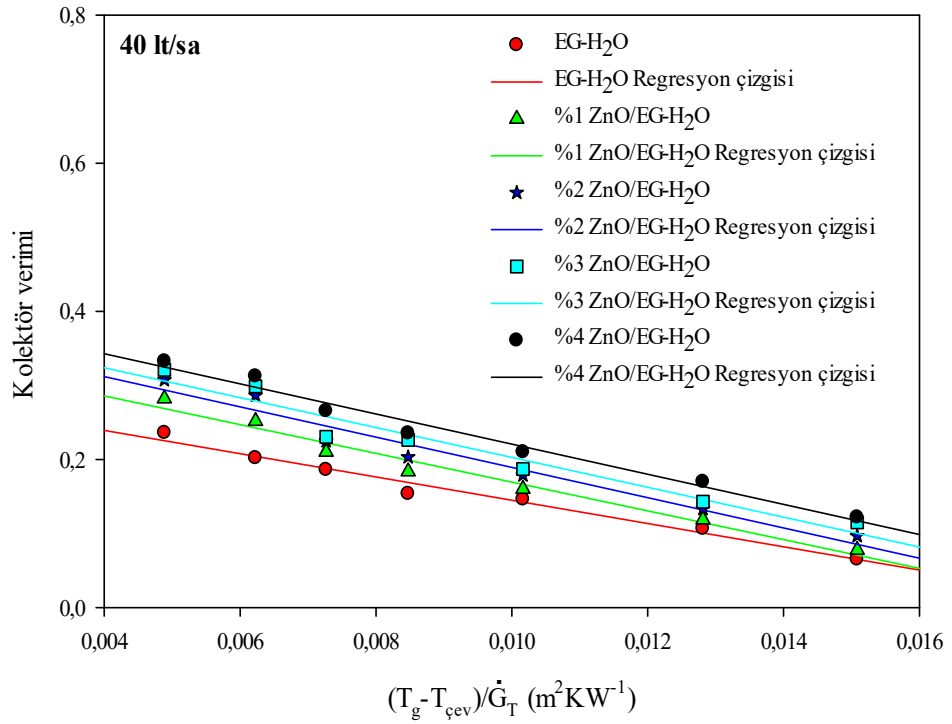
7.1.6. Kolektör Veriminin İndirgenmiş Sıcaklık Parametresi ile Değişimi

İndirgenmiş sıcaklık parametresi kolektör için önemli bir parametredir. Bu parametre çalışma akışkanının kolektöre giriş sıcaklığı ve kolektörün bulunduğu çevre sıcaklığı farkının güneş ışınım şiddetine oranı $[\frac{T_g - T_{\text{çev}}}{\dot{G}_T}]$ olarak ifade edilir. Şekil 7.5(a)-(d) kolektör veriminin indirgenmiş sıcaklık parametresine göre 20 lt/sa, 40 lt/sa, 60 lt/sa ve 80 lt/sa hacimsel debileri için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının baz akışkan olan EG-H₂O ile karşılaştırılmasını ifade etmektedir. Yukarıda bahsedildiği üzere indirgenmiş sıcaklık parametresi güneş kolektörlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Çünkü bu grafiklerin lineer regresyon çizgilerinin kolektör verim (x eksen) eksenine kesimi soğurulan enerji

parametresini $[F_R(\tau\alpha)]$, lineer regresyon çizgisinin eğimi ise atılan enerji parametresini $(F_R U_L)$ elde etmemizi sağlar. Yüksek değerli kesişim noktasının olması ($[F_R(\tau\alpha)]$ 'nin artması) ve eğimin düşük olması ($F_R U_L$ 'nin düşük olması) kolektör veriminin yüksek olması anlamına gelmektedir. Kolektörlerin performans analizinde soğurulan ve atılan enerji parametresi çok önemlidir. Şekil 7.5(a)-(d) bakıldığında hacimsel debinin artmasıyla kolektör veriminin bütün ısı transfer akışkanlarında arttığı görülmektedir. Örneğin, $(T_g - T_{cev})/\dot{G}_T = 0,006$ değerinde EG-H₂O akışkanının ve %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının 20 lt/sa ve 80 lt/sa hacimsel debilerindeki kolektör verimleri karşılaştırıldığında 80 lt/sa hacimsel debideki kolektör verimi sırasıyla %57,22 ve %39,76 oranında daha fazladır. Literatüre uygun olarak burada da nanoakışkanların baz akışkanlara göre kolektör verimine olumlu etkisi görülmektedir. Kolektör verimi, EG-H₂O akışkanına göre ZnO/EG-H₂O nanoakışkanın bütün hacimsel debilerinde daha fazladır. Örneğin, en yüksek hacimsel debide ve $(T_g - T_{cev})/\dot{G}_T = 0,006$ değerinde %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının kolektör verimi EG-H₂O baz akışkanına göre yaklaşık %30 oranında daha fazladır. Grafiklerden nanopartikül hacimsel oranının artması ile de kolektör veriminin arttığı gözlemlenebilir. Örneğin, en yüksek hacimsel debide ve $(T_g - T_{cev})/\dot{G}_T = 0,006$ değerinde %1, %2, %3 ve %4 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının EG-H₂O akışkanına göre sırasıyla %8,67, %15,47, %22,40 ve %30,00 oranında daha fazla kolektör verimine sahiptir. Bunun nedeni olarak nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla beraber nanoakışkanın radyasyon emilim kabiliyetinin artması gösterilebilir [133]. Ayrıca grafiklerden, indirgenmiş sıcaklık parametresinin artmasıyla birlikte kolektör verimi de azalmaktadır [134–136].

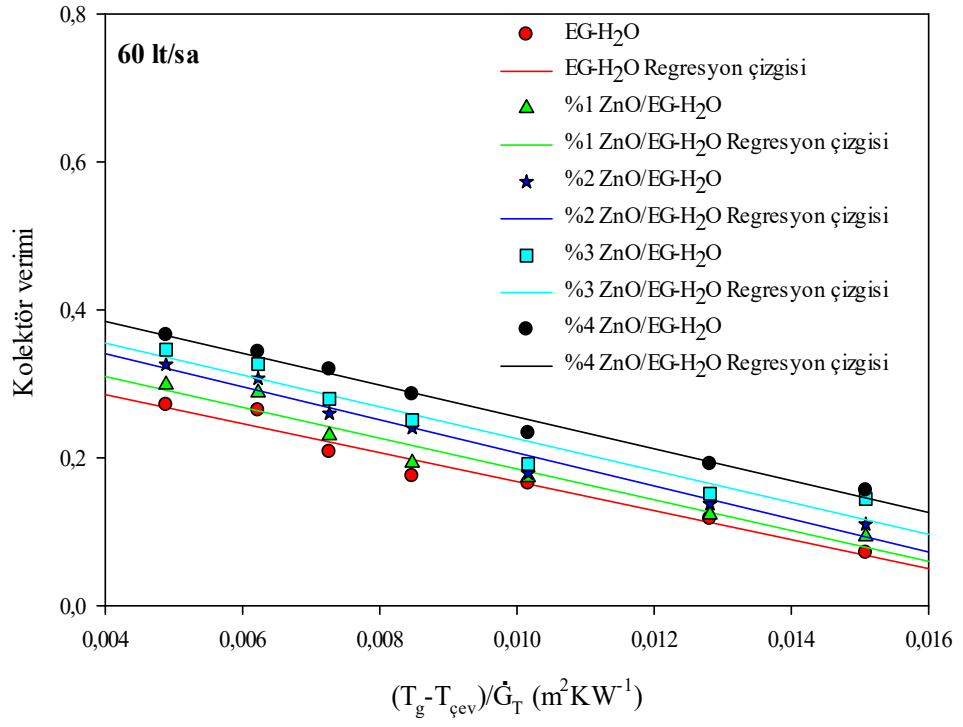


(a)

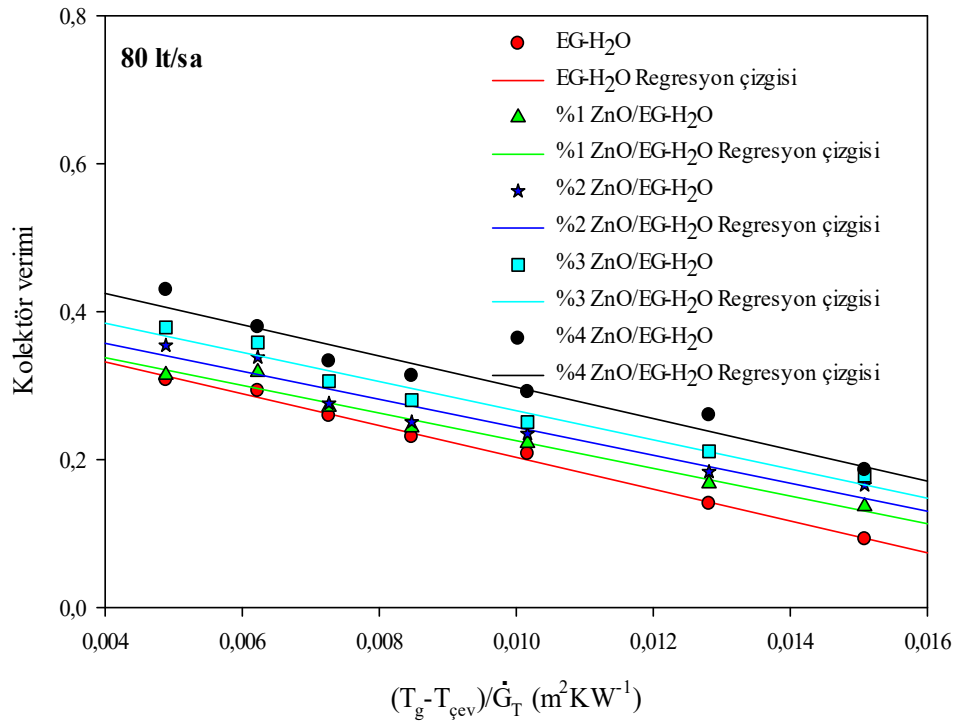


(b)

Şekil 7.5. Kolektör veriminin indirgenmiş sıcaklık parametresi ile değişimi (a) 20 lt/sa, (b) 40 lt/sa, (c) 60 lt/sa, (d) 80 lt/sa.



(c)

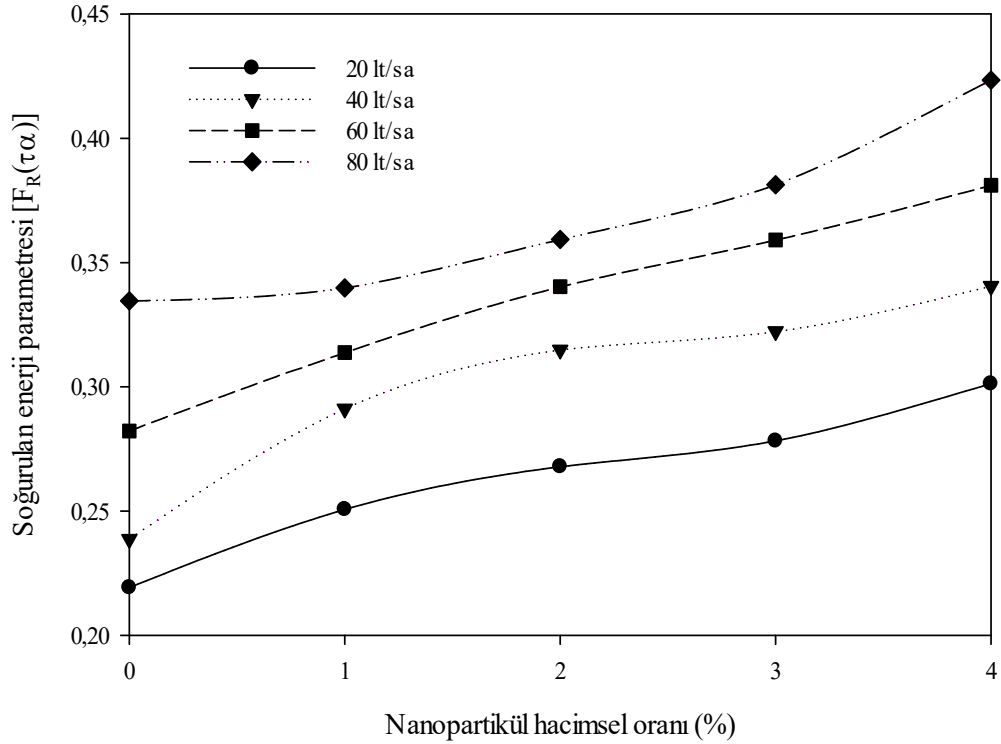


(d)

Şekil 7.5. (devam ediyor).

7.1.7. Soğurulan Enerji Parametresinin Nanopartikül Hacimsel Oranı ile Değişimi

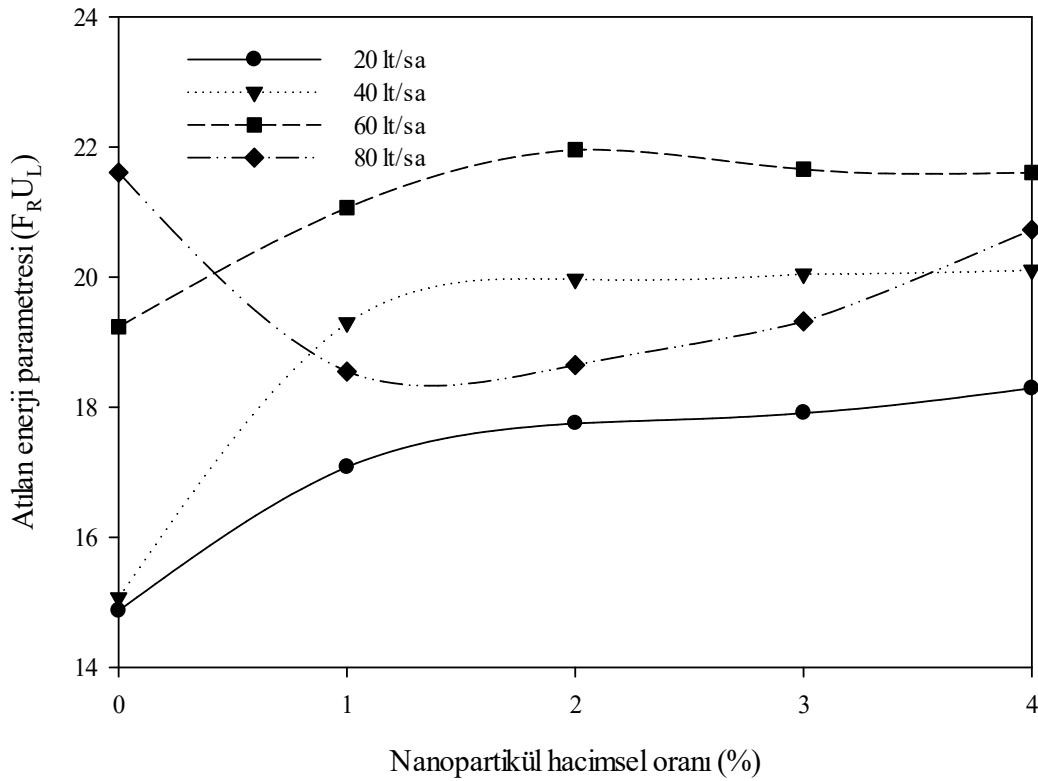
Farklı hacimsel debilerde ve nanopartikül hacimsel oranlarında soğurulan enerji parametresinin değişimi Şekil 7.6’da verilmiştir. Bir önceki bölümde sunulmuş olan kolektör verim grafiklerine uygun olarak $[F_R(\tau\alpha)]$ bütün nanopartikül hacimsel oranlarında artış göstermektedir ve maksimum değerini 80 lt/sa’lik hacimsel debide almaktadır. EG-H₂O için maksimum soğurulan enerji parametresi 0,3346 iken en düşüğü ise 0,2192’dir. %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı için en yüksek soğurulan enerji parametresi 0,4234 iken en düşüğü ise 0,3012 değerinde olduğu görülmüştür. Bir önceki bölümde de belirtildiği üzere nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla nanoakışkanın radyasyon emiciliği arttığından Şekil 7.6’da da soğurulan enerji parametresi nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla beraber artış göstermektedir.



Şekil 7.6. Soğurulan enerji parametresinin nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi.

7.1.8. Atılan Enerji Parametresinin Nanopartikül Hacimsel Oranı ile Değişimi

Şekil 7.7, atılan enerji parametresinin nanopartikül hacimsel oranı değişimini farklı hacimsel debilerde ifade etmektedir. Hacimsel debilerin 20 lt/sa, 40 lt/sa ve 60 lt/sa olduğu durumlarda nanopartikül hacimsel oranının %1 olmasına kadar artış göstermektedir. %1'den %4'e kadar atılan enerji parametresinin artış oranı %1'den daha az olduğu görülmektedir. Bu olay nanoakışkan kullanımının kolektör performansı üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir. Bunun nedeni ise önceki bölümlerde de belirtilen nanopartikül hacimsel oranının artması ile birlikte nanoakışkanın radyasyonu soğurma kapasitesinin artmasının, başka bir deyişle atılan enerjinin azalmasının bir ispatıdır. Hacimsel debinin 80 lt/sa olduğu durumda atılan enerji parametresi nanopartikül hacimsel oranının %1 olmasına kadar hızlı bir azalış daha sonra ise ılımlı bir artış göstermektedir. Fakat nanopartikül hacimsel oranının %4 olduğu durumda atılan enerji parametresi EG-H₂O akışkanına göre daha azdır. Bu durum, ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının kolektör performansı üzerindeki etkisinin EG-H₂O akışkanına göre daha fazla olduğunun diğer bir kanıtıdır.



Şekil 7.7. Atılan enerji parametresinin nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi.

Çizelge 7.2. F_R ve U_L 'nin farklı hacimsel debilerdeki ve akışkanlardaki değerleri.

Akışkan	Hacimsel debi (lt/sa)	F_R	U_L (W/m ² K)
EG-H ₂ O	20	0,26	58,00
	40	0,28	53,97
	60	0,33	58,29
	80	0,39	55,22
%4 ZnO/EG-H ₂ O	20	0,35	51,92
	40	0,39	50,49
	60	0,44	49,11
	80	0,49	41,86

Herhangi bir güneş kolektörü performans değerlendirmesinde ısı alma faktörü (F_R) ve toplam ısı transfer katsayısı (U_L) gözönüne alınan önemli parametrelerdir. Bu parametrelerden F_R 'nin yüksek, U_L 'nin düşük olması istenir [133]. Deney düzeneğimizde kullandığımız POTGÜK'e ait ısı alma faktörü ve toplam ısı transfer katsayısının farklı hacimsel debilerde ve nanoakışkan kullanılması durumundaki değerleri Çizelge 7.2'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde EG-H₂O ve %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı için hacimsel debilerin artmasıyla beraber F_R artmakta iken U_L azalmaktadır. %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının, EG-H₂O akışkanına göre ısı alma faktörü daha yüksektir, fakat toplam ısı transfer katsayısı ise daha düşüktür. Bu durum POTGÜK üzerinde ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının kullanılmasının avantajını açıkça ifade etmektedir. Örneğin, maksimum hacimsel debideki EG-H₂O akışkanı kullanılması durumunda ısı alma faktörü minimum hacimsel debiye göre %50 artış gösterirken, toplam ısı transfer katsayısı %4,79 azalmıştır. Aynı şartlarda %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının kullanılması durumunda ısı alma faktörü %40 artmıştır, toplam ısı transfer katsayısı ise %19,37 azalmıştır. Farkedileceği gibi %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının toplam ısı transfer katsayısı EG-H₂O akışkanına göre daha çok azalmıştır.

Çizelge 7.3. F_R ve U_L 'nin farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki değerleri.

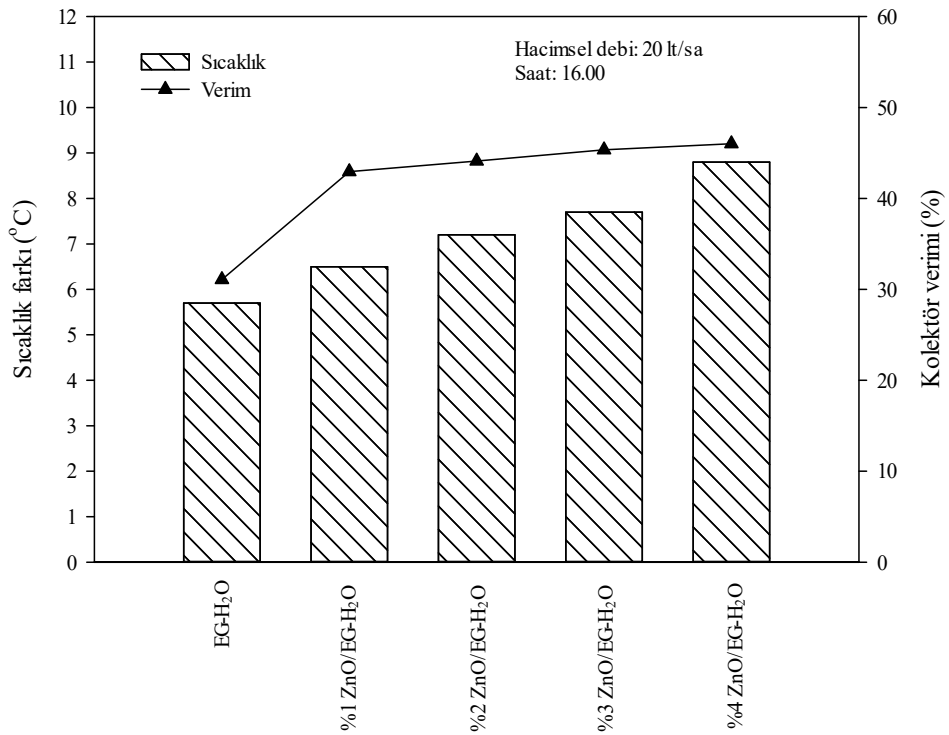
Hacimsel Debi (lt/sa)	Akışkan	Nanopartikül Hacimsel Oranı (%)	F_R	U_L (W/m ² K)
80	EG-H ₂ O	0,0	0,39	55,22
	ZnO/EG-H ₂ O	1,0	0,40	46,67
		2,0	0,42	44,38
		3,0	0,44	43,32
		4,0	0,49	41,86

Isı alma faktörü ve toplam ısı transfer katsayısının değerleri ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının %1, %2, %3 ve %4 nanopartikül oranları için Çizelge 7.3'te hacimsel debi 80 lt/sa için vermiştir. Çizelgeden nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla beraber F_R artmakta iken U_L azalmakta olduğu gözlemlenebilir. Bu durum istenilen bir durumdur. İşte nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla kolektör veriminin artması F_R 'nin artması U_L 'nin azalmasına bağlanabilir. En düşük F_R değeri ve en yüksek U_L değeri EG-H₂O akışkanına aittir. %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanına ait F_R , %1 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanına göre %22,5 artar iken U_L ise %10,30 oranında azalmıştır.

7.1.9. Sıcaklık Farkı ve Kolektör Veriminin Farklı Akışkanlar için Değişimi

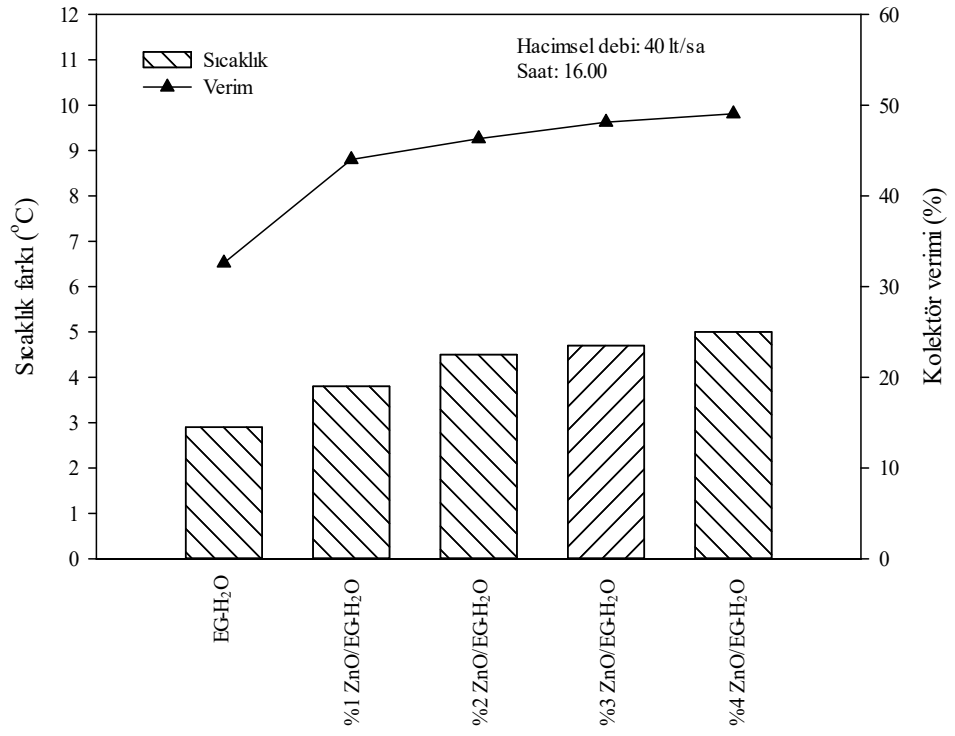
Şekil 7.8 (a)-(d) saat 16.00'daki ısı transfer akışkanının kolektörden çıkış ve kolektöre giriş sıcaklıkları farkını ve anlık kolektör veriminin değişimini farklı hacimsel debilerde ve ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının farklı nanopartikül hacimsel oranlarında ifade etmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere hacimsel debinin artması sıcaklık farkının azalmasına yol açmıştır. Bunun nedeni ise akış hızının artmasıdır ve buna bağlı olarak akışkanın soğurucu boru duvarları ile daha az temas etmesidir [133]. Ayrıca, hacimsel debi arttıkça anlık kolektör verimi de artmaktadır. Bütün hacimsel debi değerlerinde, ZnO/EG-H₂O nanoakışkan kullanımıyla sıcaklık farkı EG-H₂O baz akışkanına göre artış göstermektedir. Bunun nedeni ise nanoakışkanların radyasyon soğurma kapasitesinin baz akışkanlara göre artmasıdır. ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının

nanopartikül hacimsel oranının artışıyla ZnO/EG-H₂O nanoakışkanına ait sıcaklık farkı da artmaktadır. Özgül ısı, herhangi bir maddenin 1 kilogramının sıcaklığını 1 K arttırmak için gerekli olan ısı enerjisi miktarıdır. Bu tanımdan yola çıkarak aynı ısıya maruz kalan akışkanlardan özgül ısısı düşük olanın sıcaklığının daha çok artacağı açıktır. Nanoakışkanların bir özelliği ise nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte nanoakışkana ait özgül ısının düşmesidir [137–139]. Bu durum da ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının artan nanopartikül hacimsel oranında sıcaklık farkı artışının nedenini açıklamaktadır.

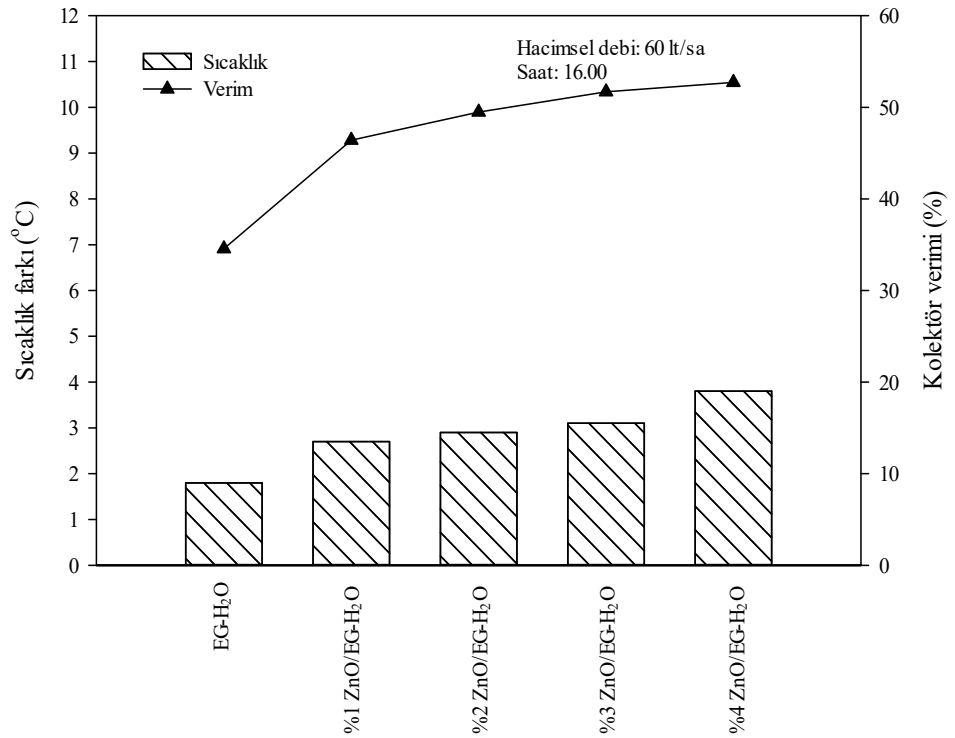


(a)

Şekil 7.8. Sıcaklık farkı ve kolektör veriminin farklı akışkanlar için değişimi (a) 20 lt/sa, (b) 40 lt/sa, (c) 60 lt/sa, (d) 80 lt/sa.

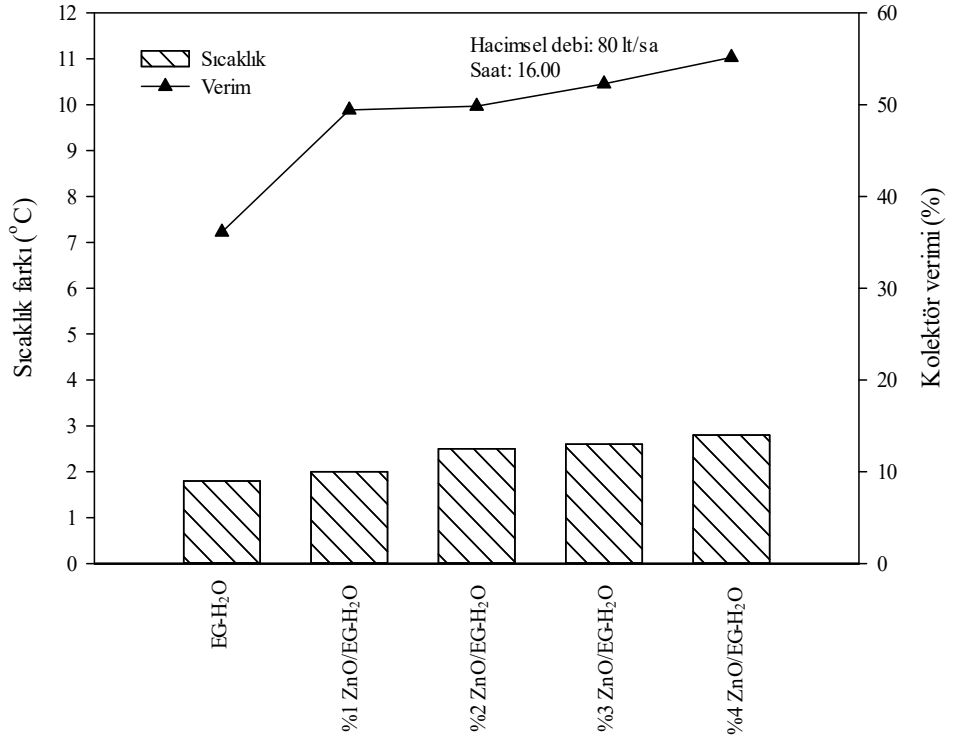


(b)



(c)

Şekil 7.8. (devam ediyor).

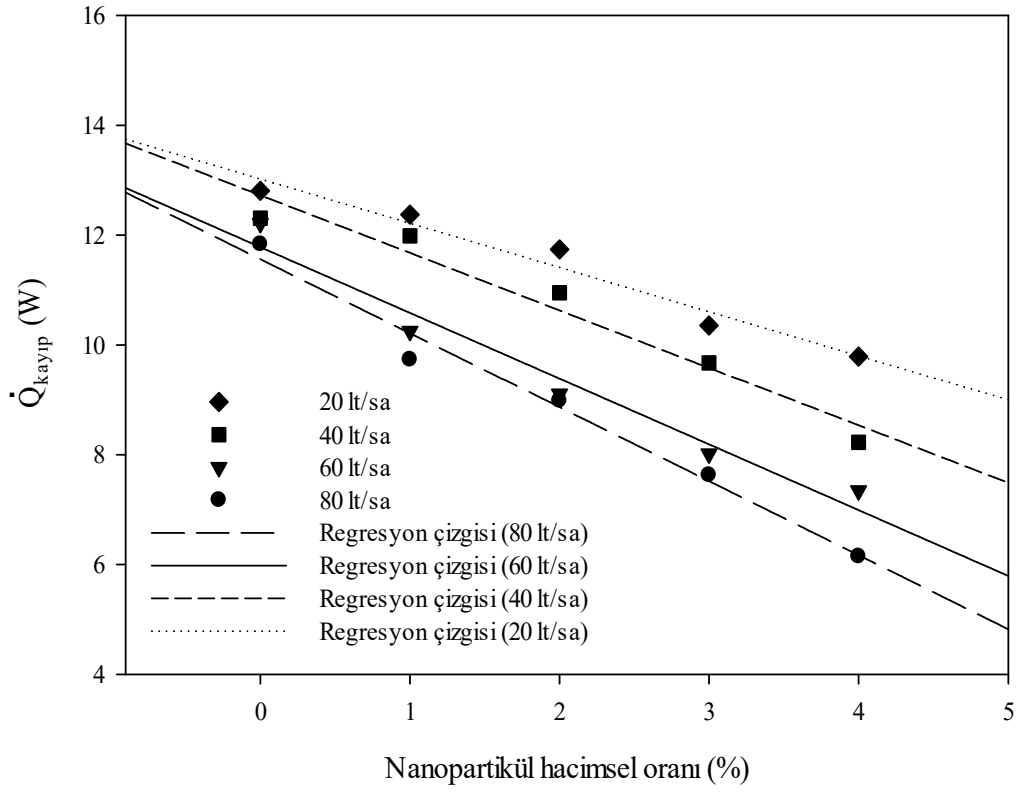


(d)

Şekil 7.8. (devam ediyor).

7.1.10. Kaybolan Enerjinin Nanopartikül Hacimsel Oranı ile Değişimi

Şekil 7.9 kaybolan enerjinin nanopartikül hacimsel oranı değişimini farklı hacimsel debilerde ifade etmektedir. Şekilden görüldüğü üzere kaybolan enerji hacimsel debinin ve nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla azalmaktadır [140,141]. Bu durumun öngörülebilir bir durumdur. Çünkü hacimsel debinin artmasıyla ve nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla kolektör verim artış göstermektedir.



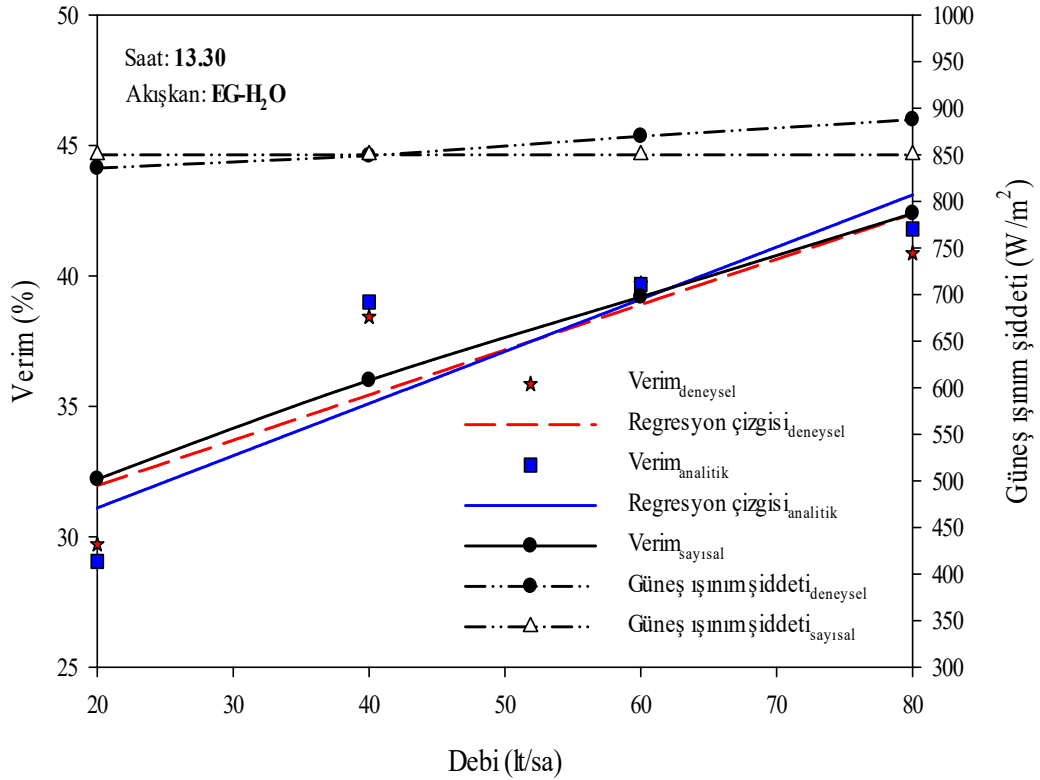
Şekil 7.9. Kaybolan enerjinin nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi.

7.2. SAYISAL BULGULAR

Bu bölümde deneysel çalışma koşulları ile aynı şartlarda POTGÜK alıcısı için gerçekleştirilen sayısal çalışma sonuçları sunulmuştur. Sayısal çalışmanın doğruluğunu ispatlamak için deneysel çalışma ile aynı sınır koşullarında anlık verim karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak sayısal çalışmada elde edilen Nusselt sayısı literatürde elde edilmiş Nusselt sayısı korelasyonu ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonuçlarının iyi uyum içinde olduğu görülmüştür. Sayısal çalışmada POTGÜK alıcısı kanatçıklı ve kanatçıksız olarak hem nanoakışkan (ZnO/EG-H₂O) hem de hibrit nanoakışkanlar (Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O ve Ag-MgO/EG-H₂O) kullanılarak dört farklı hacimsel debide ve nanopartikül hacimsel oranlarında ısı transferi ve akış karakteristikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

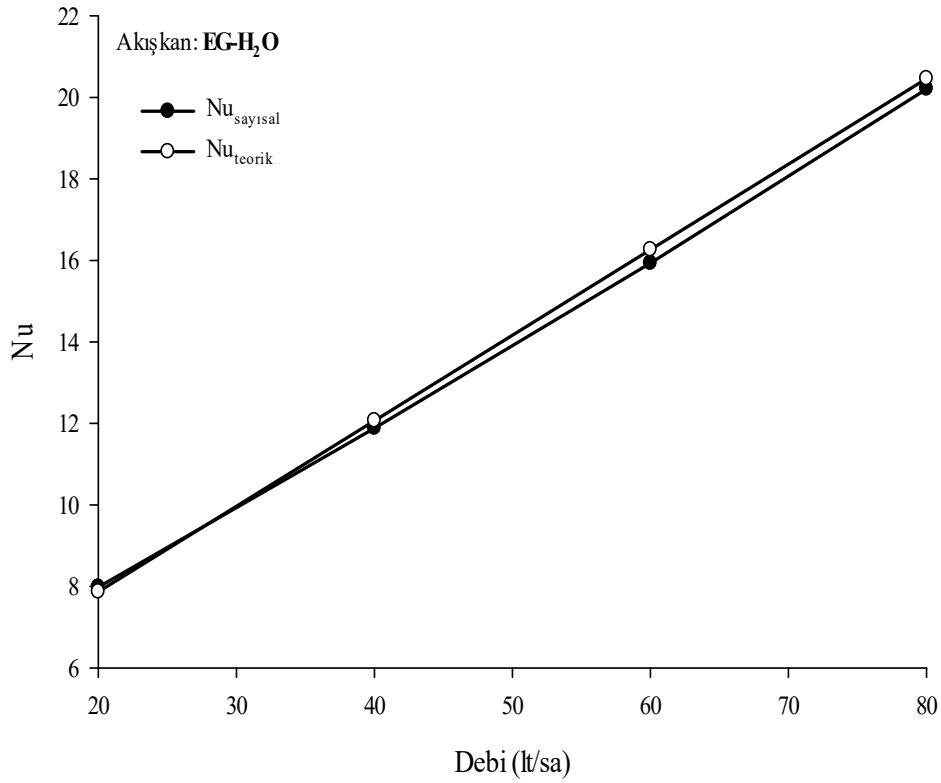
7.2.1. Sayısal Olarak Bulunan Kolektör Veriminin Doğrulanması

Şekil 7.10'de saatin 13.30 olduğu ve akışkan olarak EG-H₂O kullanıldığı zamanki deneysel ve analitik olarak hesap edilen anlık kolektör veriminin sayısal çalışma sonuçları ile karşılaştırması sunulmuştur. Sayısal çalışmada kullanılmış olan güneş ışınım şiddetinin değeri olan 850 W/m², saatin 13.30 olduğu anda bütün hacimsel debi değerlerinde ölçülen değerlerin ortalamasıdır. Grafiğe bakıldığında sayısal çalışmada kullanılan 850 W/m² güneş ışınım şiddetinde anlık kolektör verimi deneysel ve analitik veri ile uyumluluğu göze çarpmaktadır. Deneysel ve analitik kolektör verimi arasındaki en büyük hata oranı yaklaşık olarak %4'tür. Deneysel ve sayısal kolektör verimi arasındaki en büyük hata oranı ise yaklaşık olarak %2,7'dir. Bu sonuçlara göre sayısal çalışmada üç boyutlu geometri kullanılması ve homojen olmayan ısı akısı sınır şartı uygulanmasından dolayı sayısal çalışma sonuçlarının deneysel çalışma sonuçlarına daha yakın olması sağlanmıştır.



Şekil 7.10. Anlık verim ve güneş ışınım şiddetinin deneysel, analitik ve sayısal çalışma sonuçlarının kıyaslanması.

Şekil 7.11’de ise EG-H₂O akışkanı için farklı hacimsel debilerde sayısal çalışma sonucu elde edilen Nusselt sayısının literatürde kullanılan korelasyon ile karşılaştırması gösterilmektedir. Teorik Nusselt sayısı (Bkz. Eş. 6.16) sayısal olarak elde edilen Nusselt sayısı ile uyum içerisindedirler. Bu uyum aynı zamanda deneysel çalışmamızın da literatür ile doğruluğunu ispatlamaktadır. Nusselt sayısı için elde edilen en büyük fark oranı yaklaşık %8 olarak hesaplanmıştır.

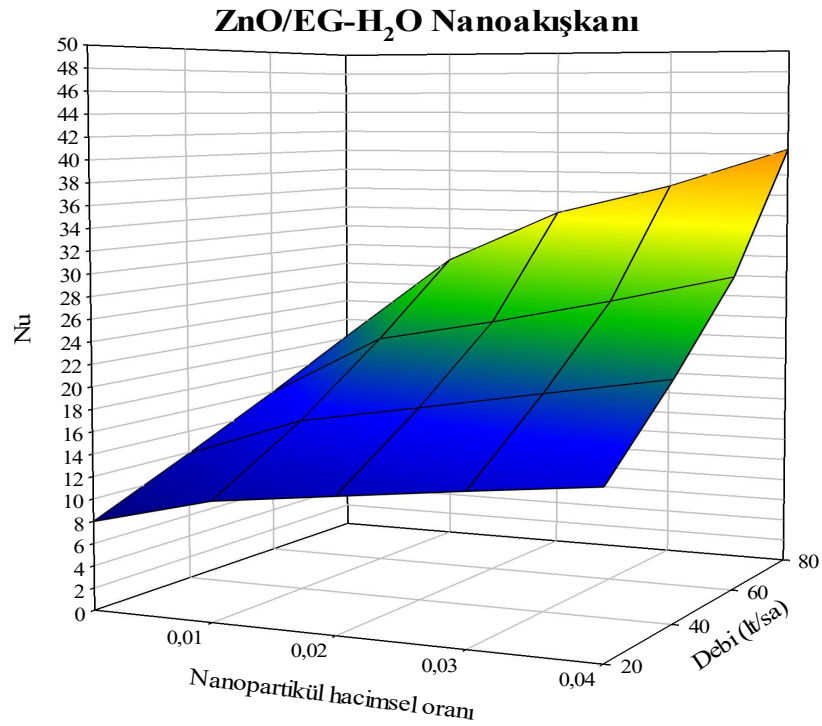


Şekil 7.11. Nusselt sayısının literatürdeki teorik korelasyonla [128] kıyaslanması.

7.2.2. Kanatçıksız Soğurucuda Nanoakışkan ve Hibrit Nanoakışkanların Isı ve Akış Karakteristiklerine Etkisi

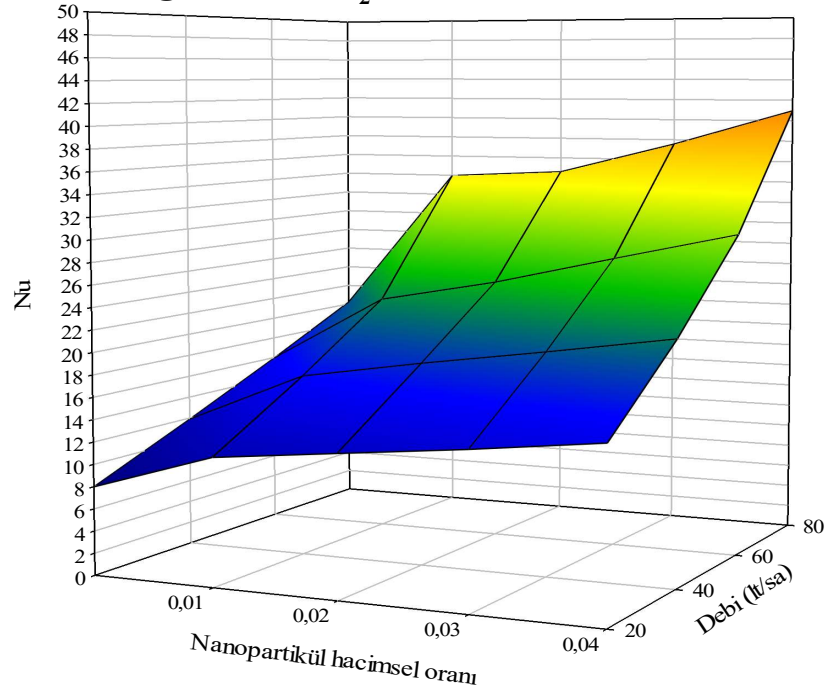
Nusselt sayısının tek nanopartiküllü ve hibrit nanopartiküllü nanoakışkanlar kullanılarak farklı hacimsel debilerde ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi Şekil 7.12’te verilmiştir. Nusselt sayısı bütün akışkanlarda hacimsel debinin ve nanopartikül hacimsel oranlarında artış göstermektedir. Nanoakışkanların baz akışkan olan EG-H₂O akışkanına olan üstünlüğü açık şekilde görülmektedir. Bunun nedeni olarak nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayısının geleneksel akışkanlara oranla daha

yüksek olması gösterilebilir [142,143]. Grafiklere bakıldığında hibrit nanoakışkanların Nusselt sayısı tek nanopartiküllü nanoakışkan olan ZnO/EG-H₂O 'ya göre daha yüksektir. En yüksek Nusselt sayısı 80 lt/sa hacimsel debide ve %4 nanopartikül oranına sahip Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanında görülmektedir. Örneğin, 80 lt/sa hacimsel debide ve %4 nanopartikül hacimsel oranına sahip hibrit nanoakışkan Ag-MgO/EG-H₂O kullanıldığında Nusselt sayısı, EG-H₂O ve ZnO/EG-H₂O'ye göre sırasıyla %134,55 ve %17,1 oranlarında artış göstermektedir.

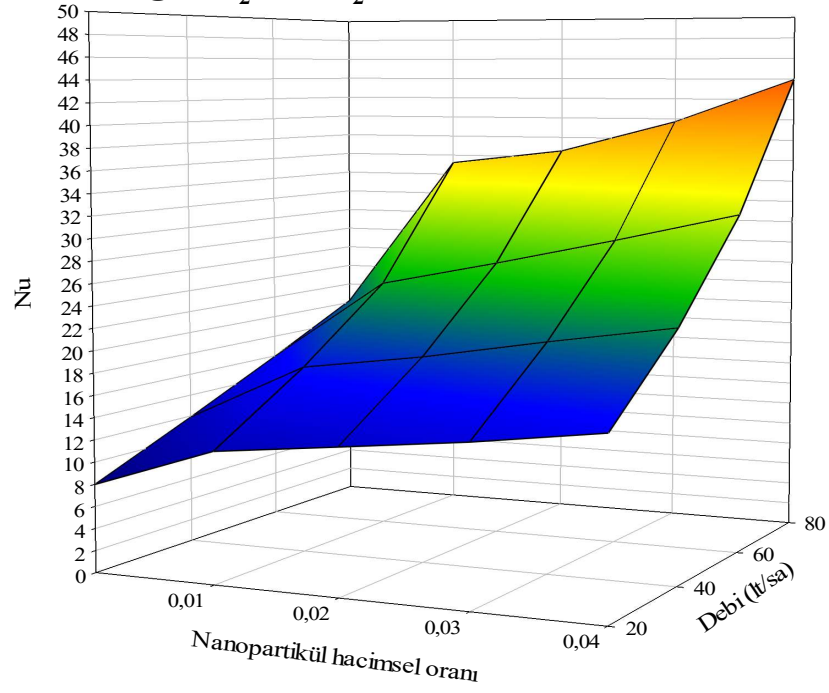


Şekil 7.12. Nusselt sayısının farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.

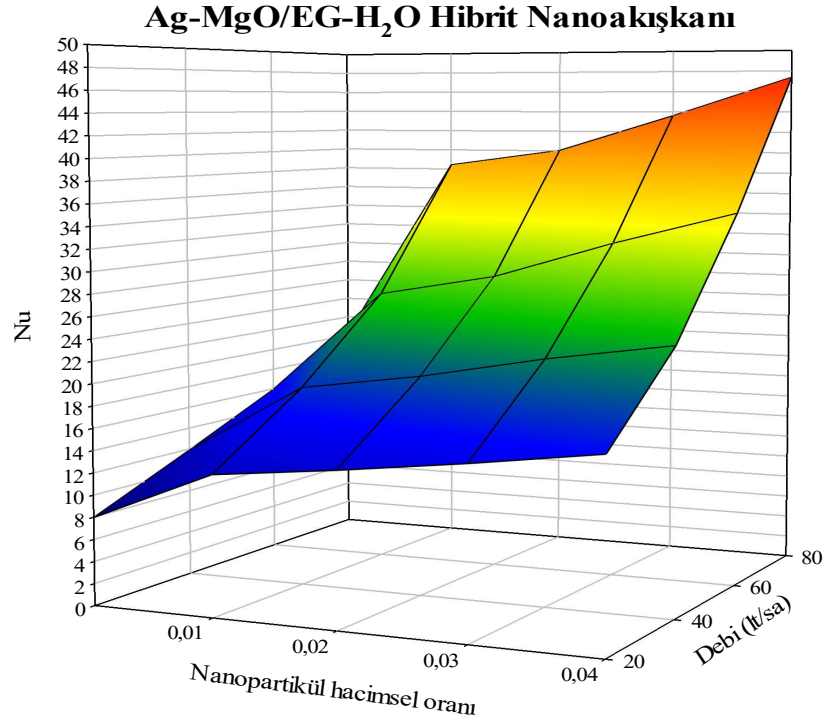
Ag-ZnO/EG-H₂O Hibrit Nanoakışkanı



Ag-TiO₂/EG-H₂O Hibrit Nanoakışkanı

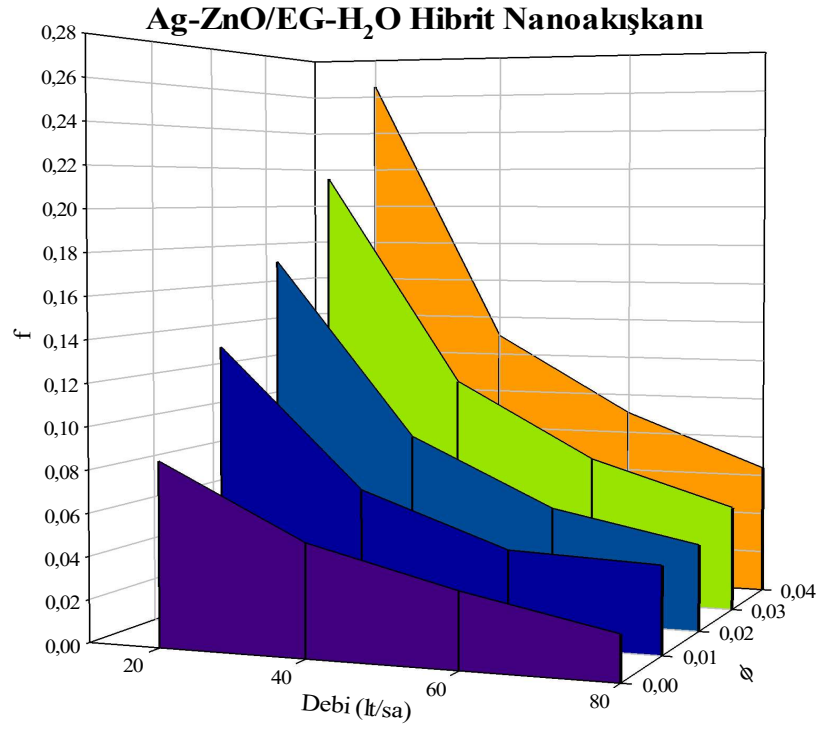
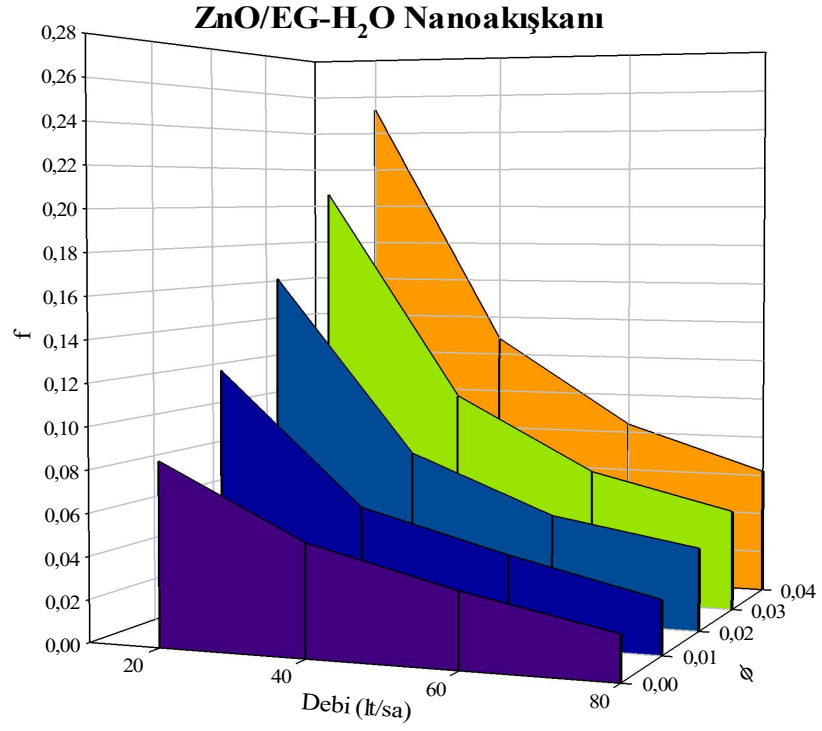


Şekil 7.12. (devam ediyor).

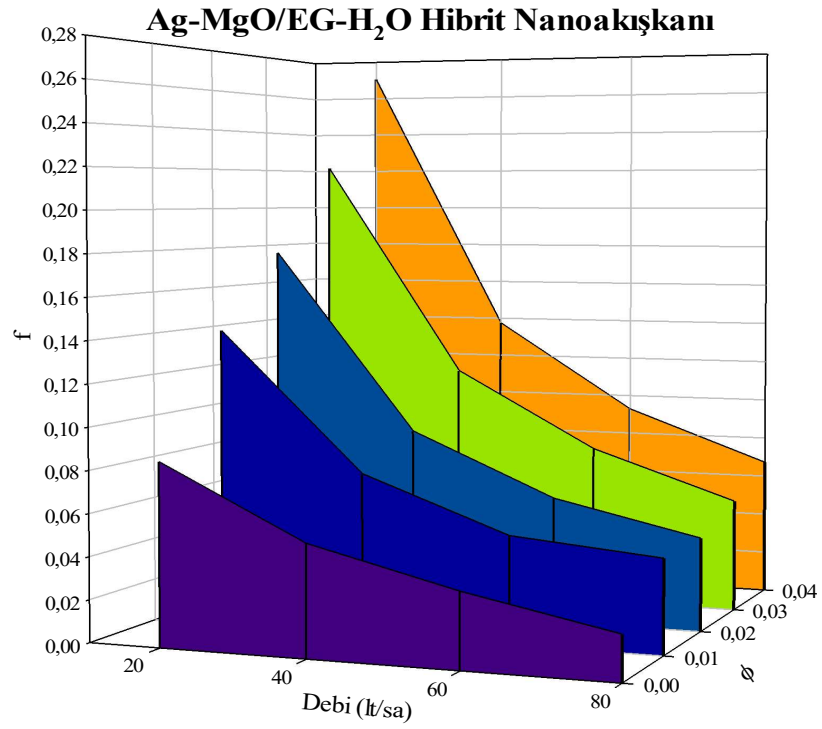
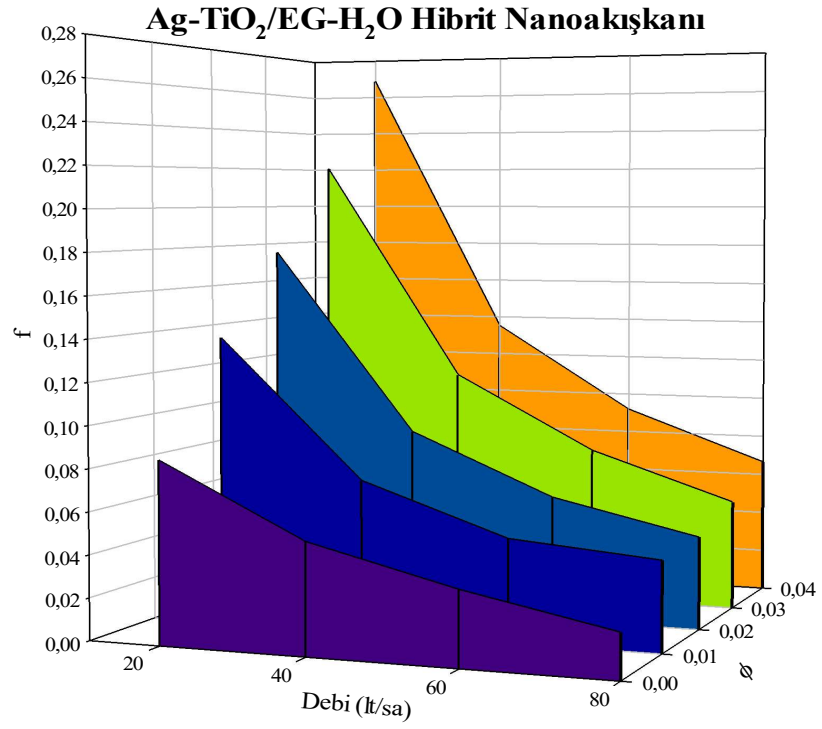


Şekil 7.12. (devam ediyor).

Şekil 7.13, soğurucu boru içerisindeki sürtünme faktörünün tek nanopartiküllü ve hibrit nanopartiküllü nanoakışkanlarla değişimini farklı hacimsel debilerde ve nanopartikül hacimsel oranlarında incelenmesini göstermektedir. Sürtünme faktörü bütün tek nanopartiküllü ve hibrit nanopartiküllü nanoakışkanlar kullanıldığı durumlarda EG-H₂O'ya göre artış göstermektedir. Bunun nedeni olarak baz akışkana nanopartikül eklenmesiyle viskozitenin ve yoğunluğunun artması gösterilebilir [78]. Grafikler incelendiğinde en yüksek sürtünme faktörü değerleri hibrit nanoakışkanlara aittir. Bu sonuç doğal olarak beklenir. Çünkü hibrit nanoakışkan elde edilirken baz akışkana daha çok nanopartikül eklenmektedir. Fakat tek nanopartiküllü ve hibrit nanopartiküllü nanoakışkanlar arasındaki sürtünme faktörü artış oranı çok fazla değildir. Bu sonuç kolektörde hibrit nanoakışkanların kullanımı için bir avantajı ifade eder. Sürtünme faktörü hacimsel debinin artmasıyla birlikte akışkan hızındaki artışa bağlı olarak bütün akışkanlarda azalmaktadır [78,144–146].



Şekil 7.13. Sürtünme faktörünün farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.



Şekil 7.13. (devam ediyor).

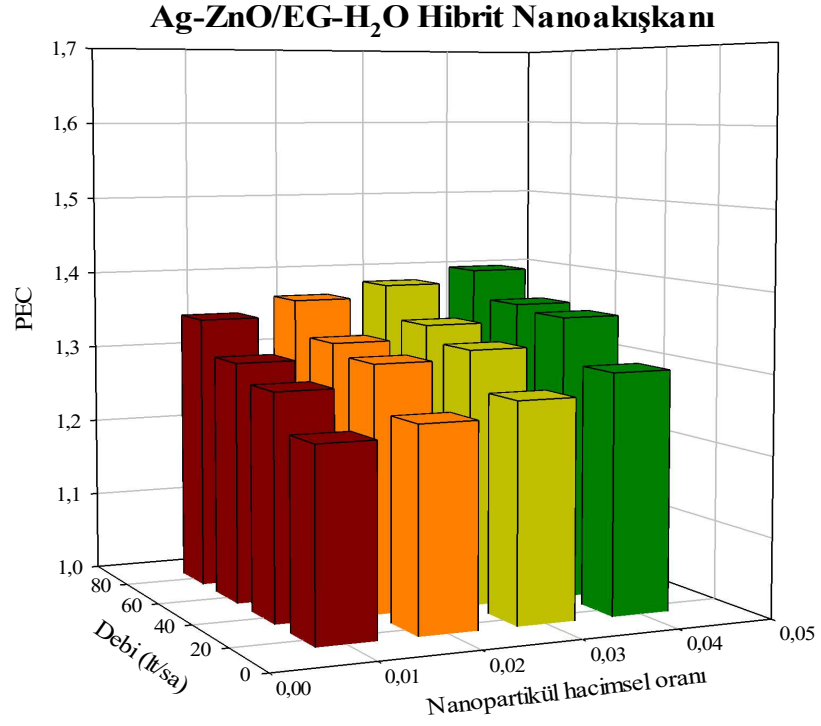
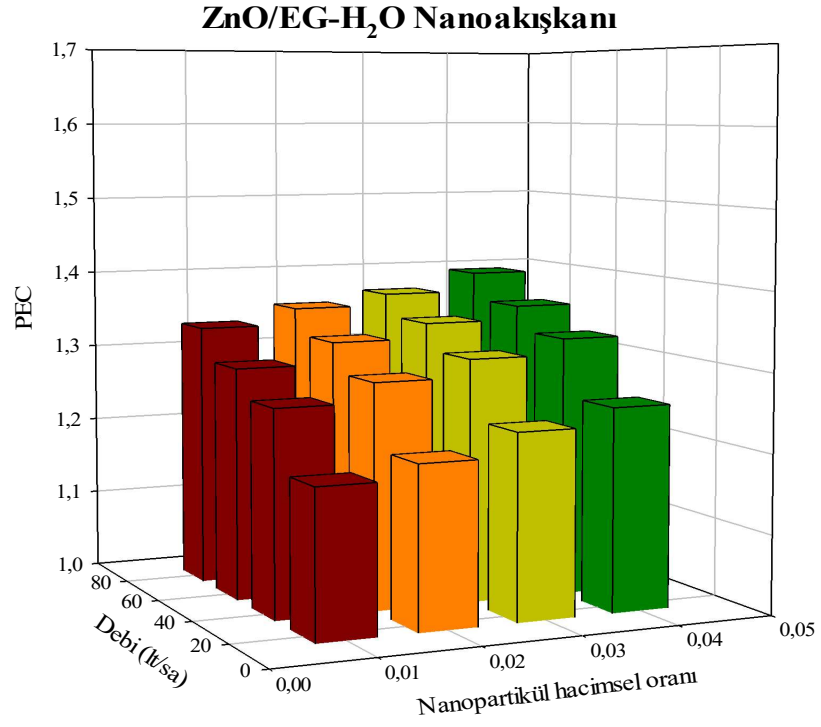
Şekil 7.14, PEC sayısının farklı akışkanların farklı hacimsel debi ve nanopartikül hacimsel oranlarında dağılımını göstermektedir. Yukarıda belirtildiği üzere tek nanopartiküllü veya hibrit nanopartiküllü nanoakışkanların sistemde kullanılmasıyla

hem ısı transferi hem de sürtünme faktörü artmaktadır. Eğer bu akışkanlar sürtünme faktörünü, ısı transferine göre daha çok artırıyorsa bu akışkanları sistemde kullanmak avantaj sağlamaz. Bunun için, herhangi bir sistemde kullanılan akışkanda ısı transferi arttırma oranı mı yoksa sürtünme faktörü artış oranı mı baskın onu ifade eden bir eşitlik bulunmuştur. Bu eşitlik aşağıdaki gibidir. Kullanılan bu eşitlik sonucunda eğer PEC sayısı 1'den büyük ise ısı transferi, eğer PEC sayısı 1'den küçük ise sürtünme faktörü baskındır. Eğer PEC sayısı 1'e eşitse ısı transferi ve sürtünme artış oranları birbirine eşittir [78].

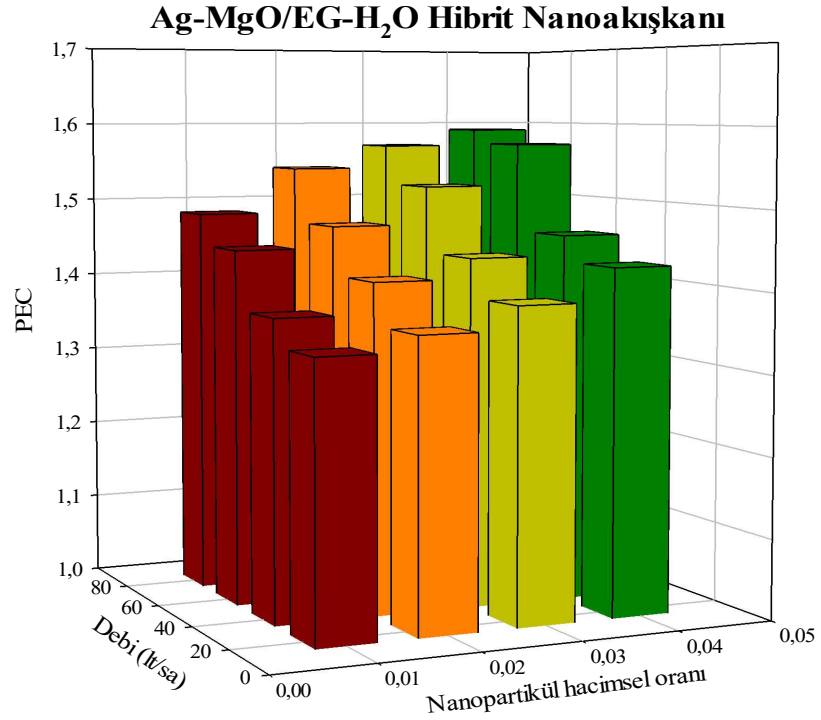
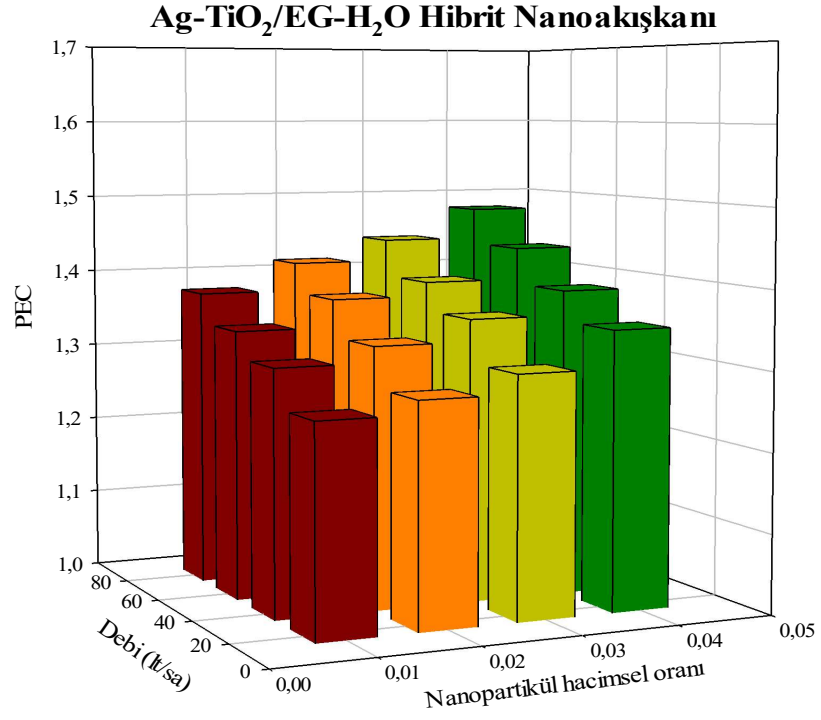
PEC sayısı aşağıdaki formülle hesaplanabilir [147]:

$$PEC = \frac{Nu_{eff}/Nu_f}{\left(f_{eff}/f_f\right)^{1/3}} \quad (7.1)$$

Bu bilgiler ışığında grafiklere bakıldığında ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı ve diğer hibrit nanoakışkanlarının PEC sayıları 1'den büyüktür. Bu sonuç, tek nanopartiküllü ve hibrit nanopartiküllü nanoakışkanların ısı transferinin sürtünme faktörüne göre baskın olduğunu göstermektedir. Yukarıda da bahsedildiği üzere PEC sayısının bütün nanoakışkanlarda 1'den büyük olması, POTGÜK alıcısında nanoakışkan kullanımının avantajlı bir durum olduğunu göstergesidir. Nanopartikül hacimsel oranının ve hacimsel debinin artmasıyla PEC sayısı da artış göstermektedir. En yüksek PEC sayısına Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanı sahipken, en düşük PEC sayısına ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı sahiptir. Örneğin, 80 lt/sa hacimsel debi ve %1 nanopartikül hacimsel oranında Ag-MgO/EG-H₂O'ya ait PEC sayısı ZnO/EG-H₂O'ya göre %11,27 oranında daha yüksektir. 80 lt/sa hacimsel debi ve %4 nanopartikül hacimsel oranında Ag-MgO/EG-H₂O'ya ait PEC sayısı ZnO/EG-H₂O'ya göre %14,38 oranında daha yüksektir. Buradan nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla PEC sayısındaki artışında daha fazla olduğu anlaşılabilir.



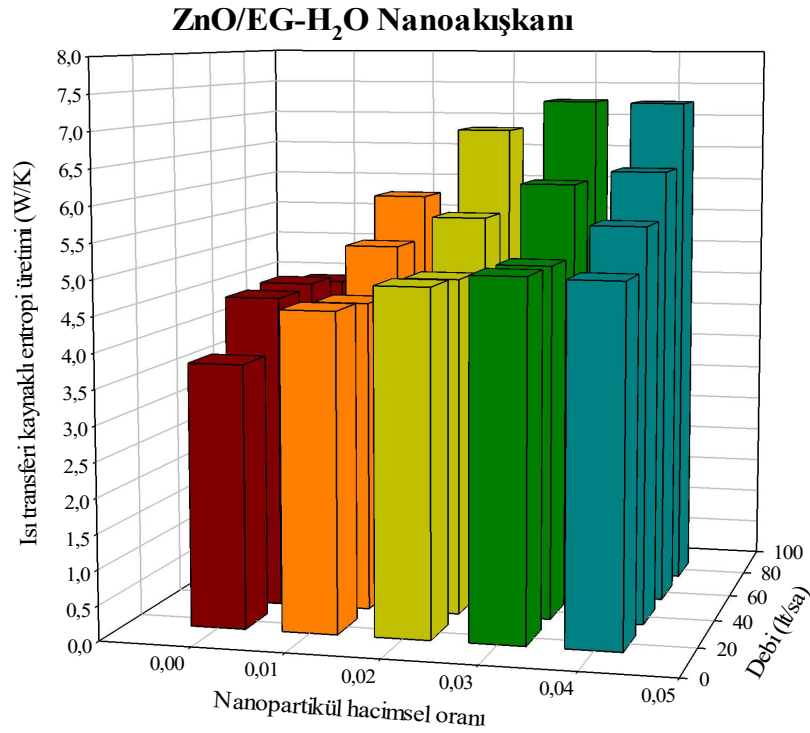
Şekil 7.14. PEC sayısının farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.



Şekil 7.14. (devam ediyor).

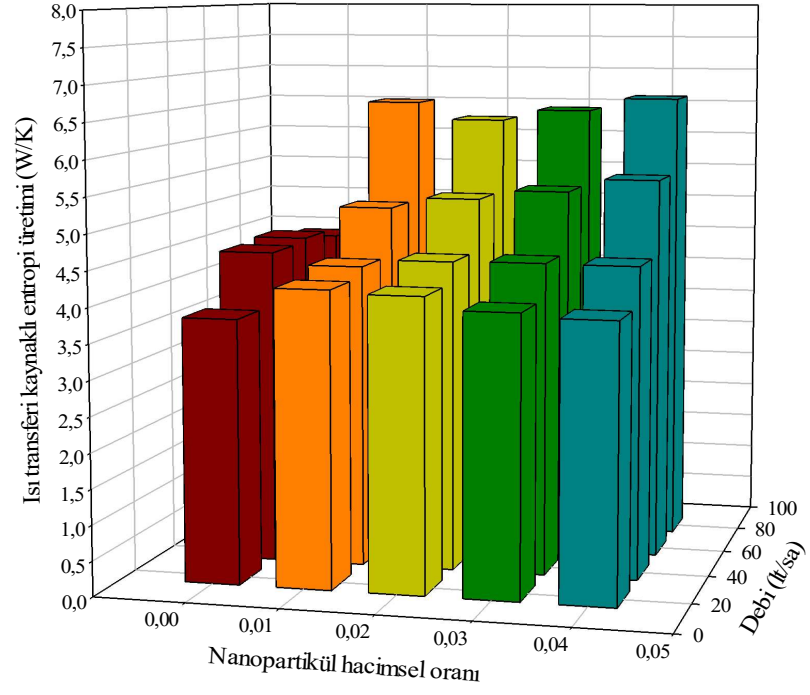
Son yıllarda, en iyi mühendislik sistem tasarımlarını bulmak için entropi üretiminin minimizasyonu için termodinamiğin ikinci yasası uygulanmaktadır [148]. Entropi üretimi, bir işlem sırasında biriken tersinmezliklerin seviyesini belirlemektedir. Sonuç

olarak, entropi üretimi, mühendislik cihazlarının performansını değerlendirmek için bir kriter olarak kullanılmaktadır. Genel olarak bir sistemde entropi üretimi, ısı transferinden ve sürtünmeden olmak üzere iki şekilde oluşur [149]. Şekil 7.15'te ısı transferinden kaynaklanan entropi üretiminin farklı akışkan, hacimsel debi ve nanopartikül hacimsel oranlarında değişimi sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde hibrit nanoakışkanların artan nanopartikül hacimsel oranlarında ısı transferi kaynaklı entropi üretimi azalmaktadır [150]. Bu durum yüksek ısı transfer performansı gösteren hibrit nanoakışkanların POTGÜK'te kullanılmasının bir avantaj olduğunu göstermektedir. En düşük ısı transferi kaynaklı entropi üretimi, hacimsel debinin 20 lt/sa ve nanopartikül hacimsel oranının %4 olduğu durumda Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanı kullanıldığında gerçekleşmiştir. Aynı şartlar altında en yüksek ısı kaynaklı entropi üretimi ise ZnO/EG-H₂O nanoakışkanında oluşmuştur. Ayrıca, hacimsel debinin artmasıyla birlikte genellikle ısı kaynaklı entropi üretimi artmaktadır [151].

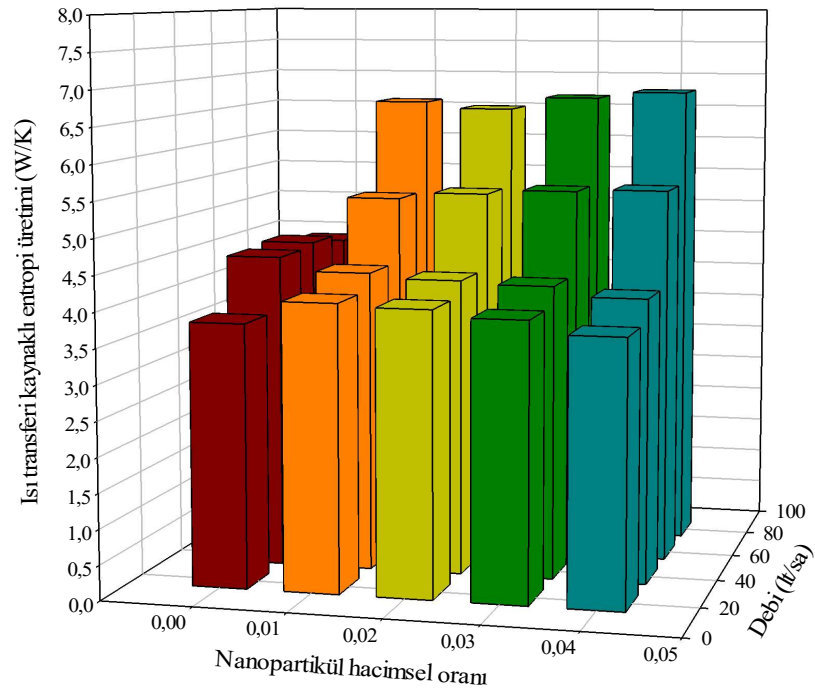


Şekil 7.15. Isı transferinden kaynaklanan entropi üretiminin farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.

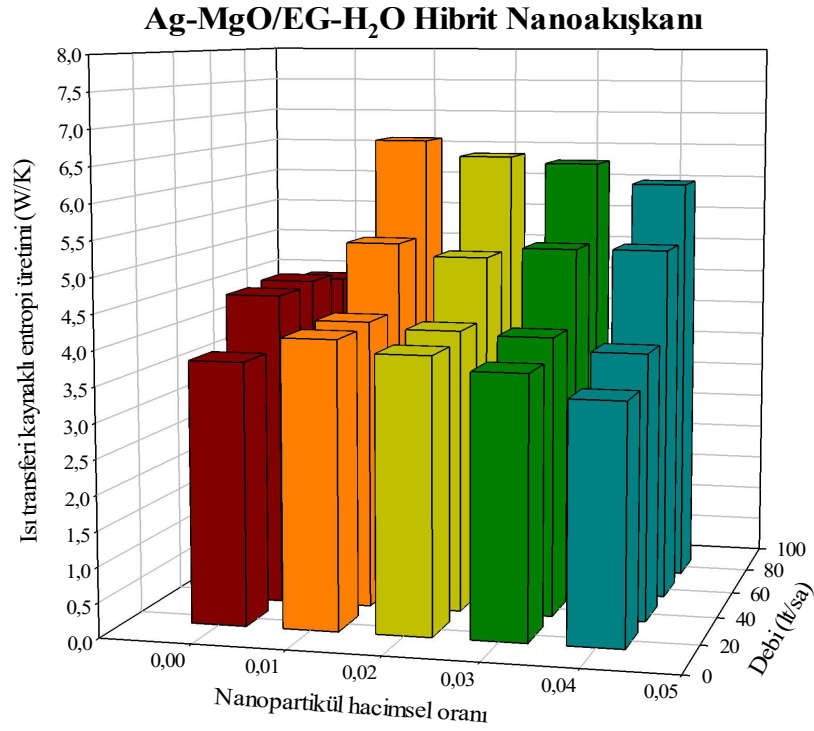
Ag-ZnO/EG-H₂O Hibrit Nanoakışkan



Ag-TiO₂/EG-H₂O Hibrit Nanoakışkan

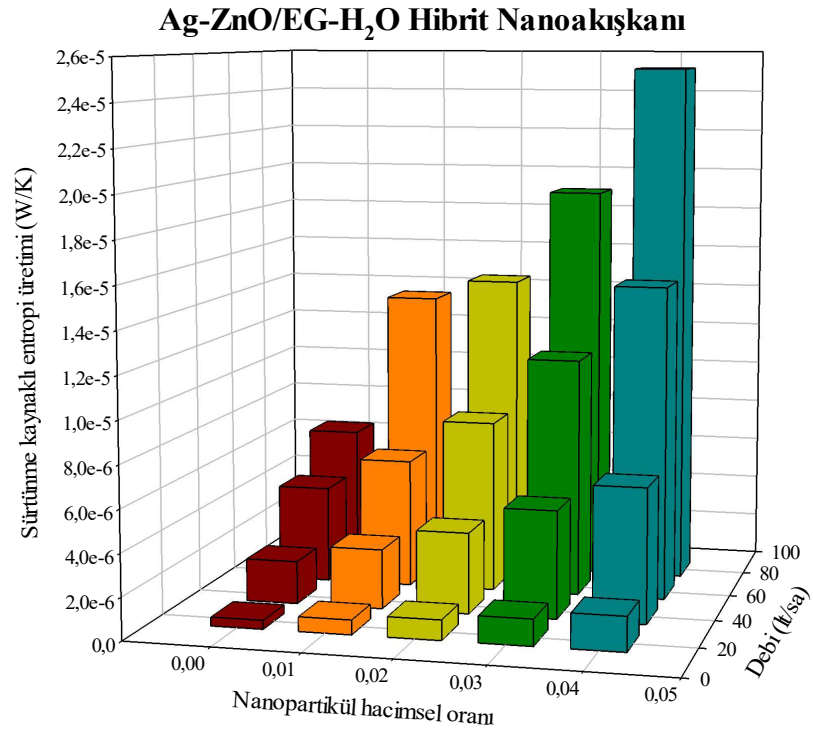
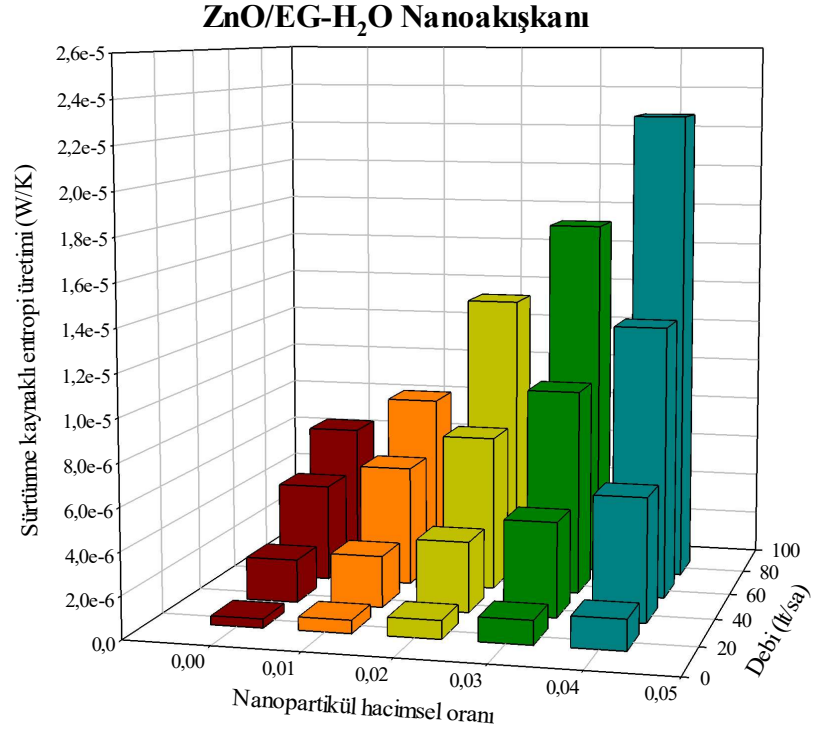


Şekil 7.15. (devam ediyor).

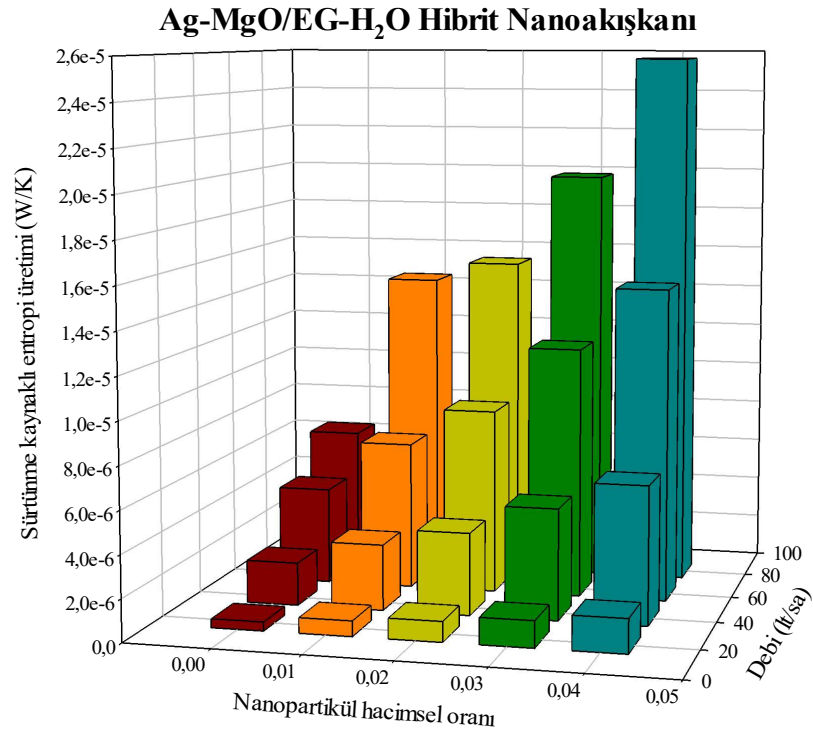
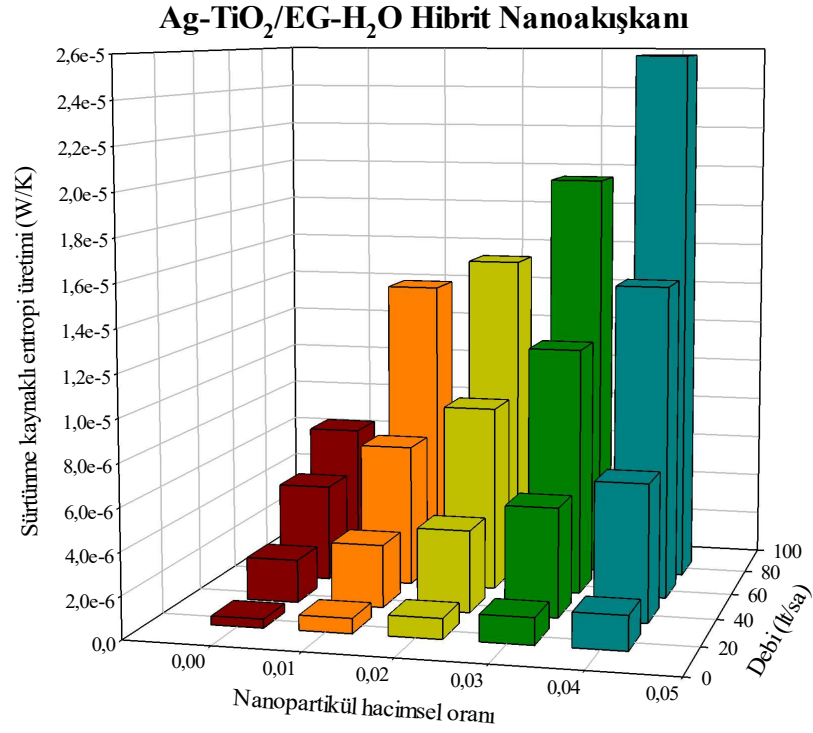


Şekil 7.15. (devam ediyor).

Şekil 7.16’da farklı akışkanların farklı hacimsel debi ve nanopartikül hacimsel oranlarında sürtünmeden kaynaklı entropi üretimi dağılımları verilmiştir. Sürtünmeden kaynaklı entropi üretimi bütün akışkanlarda hacimsel debilerin ve nanopartikül hacimsel oranlarının artmasıyla artmaktadır [152]. En düşük sürtünme kaynaklı entropi üretimini EG-H₂O akışkanı oluştururken en yüksekini ise Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanı oluşturmaktadır. Bunun nedeni ise tamamen viskozitenin yüksek ya da düşüklüğü ile ilgilidir. Grafiklerden aynı akışkan üzerinde hacimsel debi artışının nanopartikül hacimsel oranı artışına göre sürtünmeden kaynaklı entropi üretimi üzerinde daha etkili olduğu çıkarılabilir.



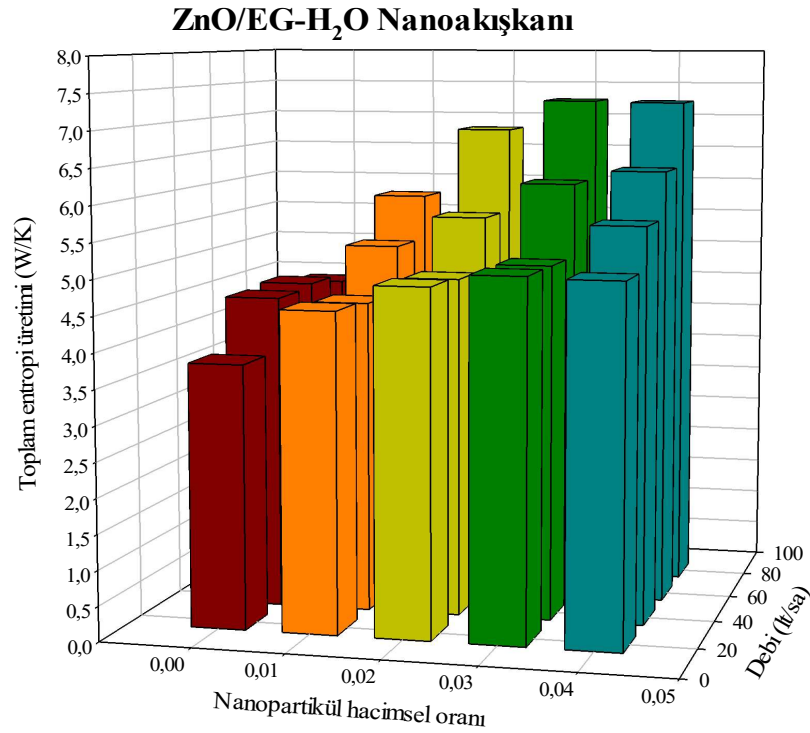
Şekil 7.16. Sürtünmeden kaynaklanan entropi üretiminin farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.



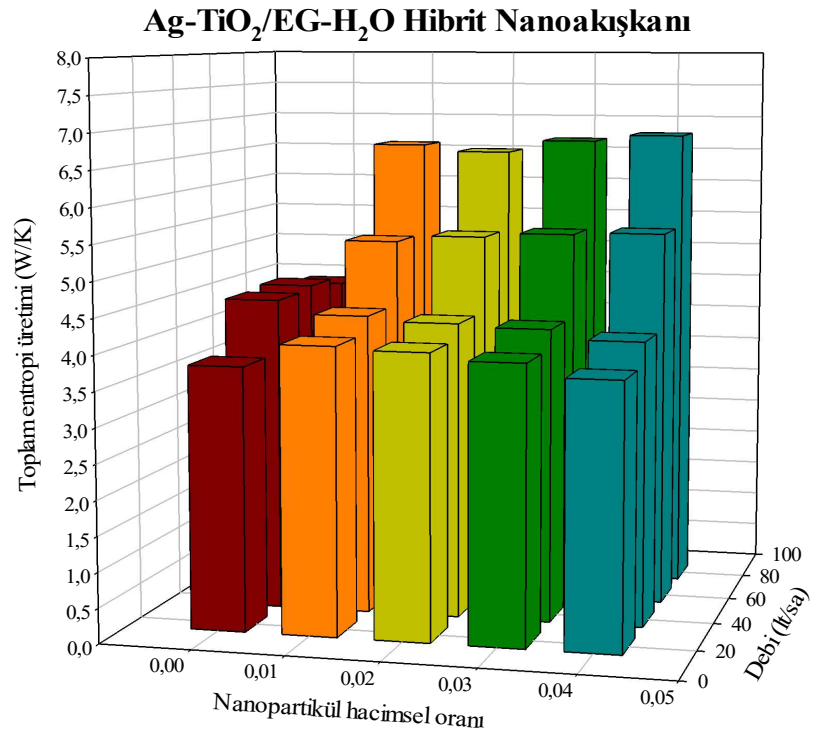
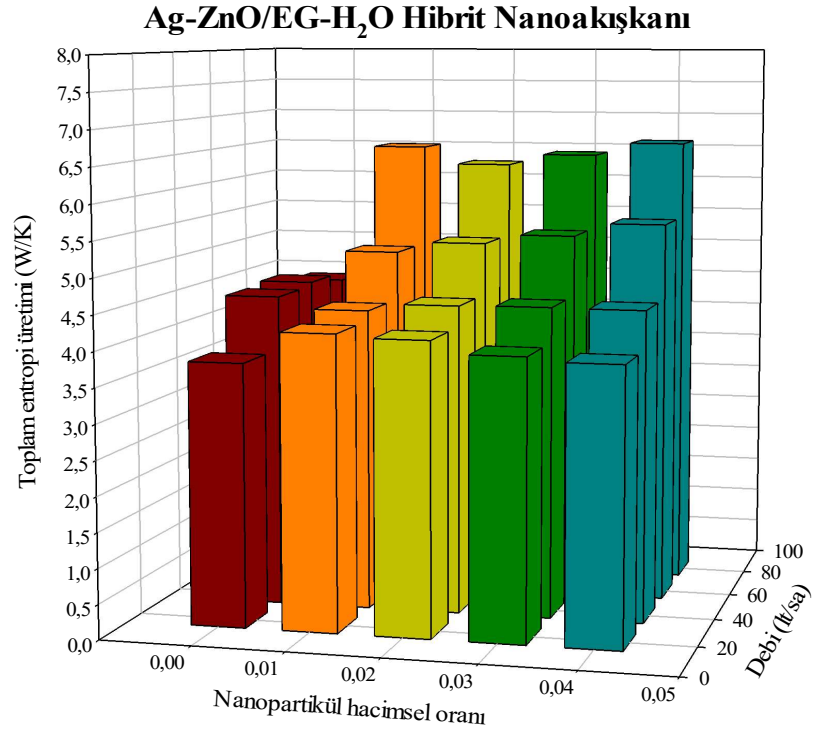
Şekil 7.16. (devam ediyor).

Şekil 7.17’de ise toplam entropi üretiminin (ısı transferinden kaynaklanan entropi üretimi ve sürtünmeden kaynaklanan entropi üretimi) EG-H₂O, ZnO/EG-H₂O, Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O ve Ag-MgO/EG-H₂O akışkanları için 20 lt/sa,

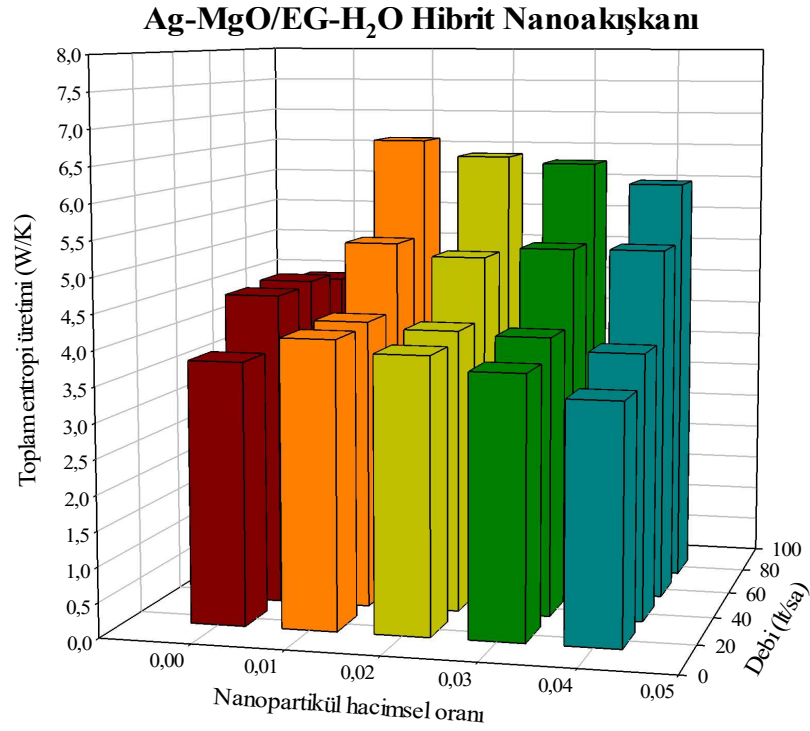
40 lt/sa, 60 lt/sa ve 80 lt/sa'lik hacimsel debilerde ve %1, %2, %3 ve %4 nanopartikül hacimsel oranlarında değişimleri sunulmaktadır. Grafiklerden görüleceği üzere toplam entropi üretimi, ısı transferinden kaynaklanan entropi üretimi ile aynı değişim eğilimini göstermektedir. Bunun nedeni ise sürtünmeden kaynaklı entropi üretimi, ısı transferi kaynaklı entropi üretiminden çok daha düşük olmasıdır. Buraya kadarki bilgiler ve sonuçlar ışığında POTGÜK için en iyi performanslı akışkan ve çalışma koşulu seçimi yapılabilir. Bu bağlamda, hacimsel debinin 80 lt/sa ve nanopartikül hacimsel oranının %4 olduğu durumda Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanının kullanılması POTGÜK üzerinde en iyi performansı sağlayacağı sonucuna varılabilir.



Şekil 7.17. Toplam entropi üretiminin farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.

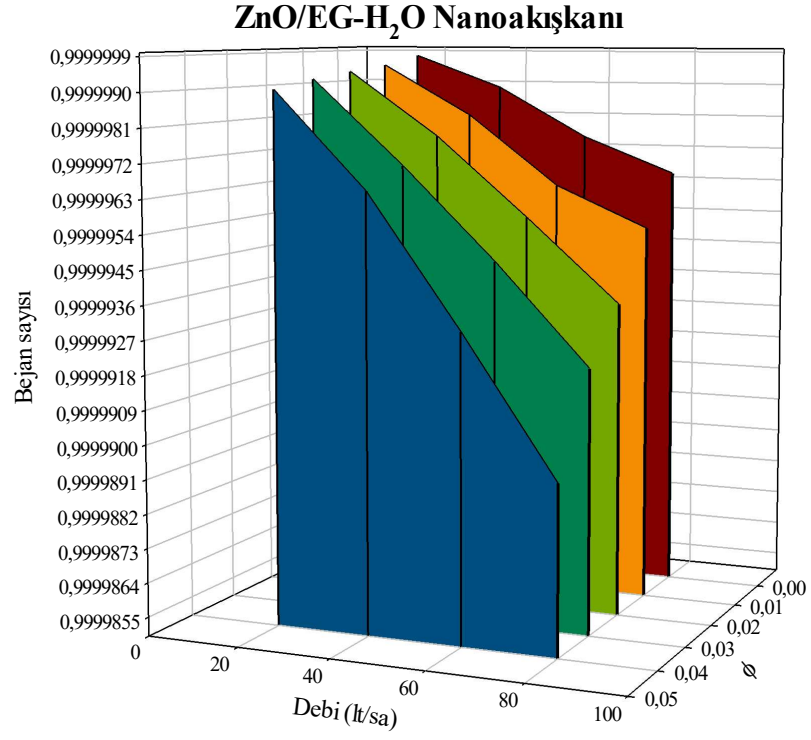


Şekil 7. 17. (devam ediyor).

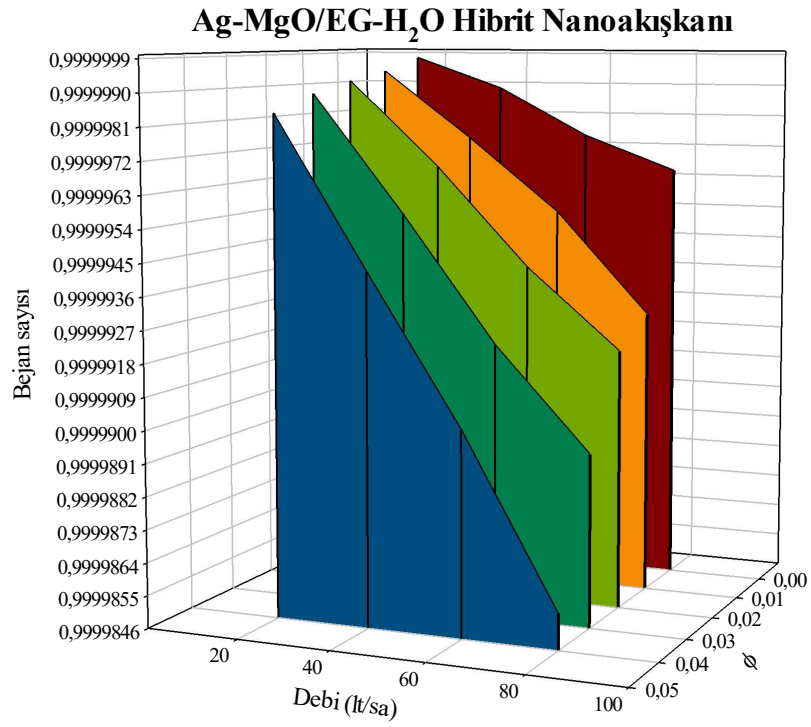
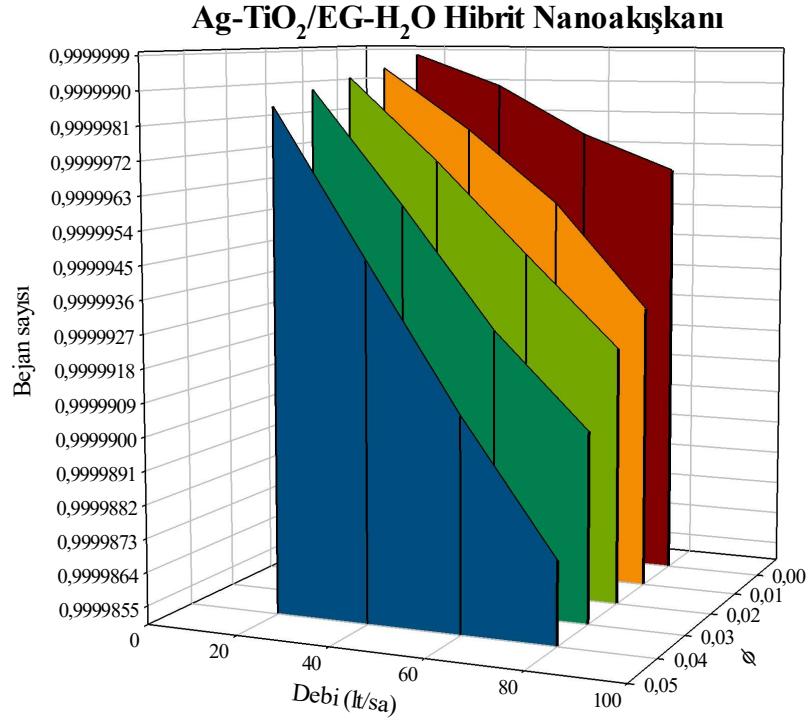


Şekil 7. 17. (devam ediyor).

Şekil 7.18’de Bejan sayısının tek nanopartiküllü ve hibrit nanopartiküllü nanoakışkanları için farklı debilerde ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki dağılımları verilmiştir. Bejan sayısı 1’e ne kadar yaklaşırsa sürtünmeden kaynaklı entropi üretiminin ihmal edilebilir, ısı transferinden kaynaklı entropi üretiminin de toplam entropi üretiminde o derece baskın olduğu anlaşılmalıdır [152]. Grafiklere bakıldığında Bejan sayısının bütün akışkanlarda ve nanopartikül hacimsel oranlarında 1’e çok yakın olduğu anlaşılmaktadır. Fakat çok küçük farklarla da olsa Bejan sayısı nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte azalmakta olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışkan viskozitesinin artışına bağlı olarak sürtünmeden kaynaklı entropi üretiminin artması gösterilebilir. Aynı zamanda çok küçük farklarla Bejan sayısı hacimsel debi ile ters orantılı olarak değişim sergilemektedir [152]. Bu durumun nedeni de sürtünme kaynaklı entropi üretimini artış göstermesidir.



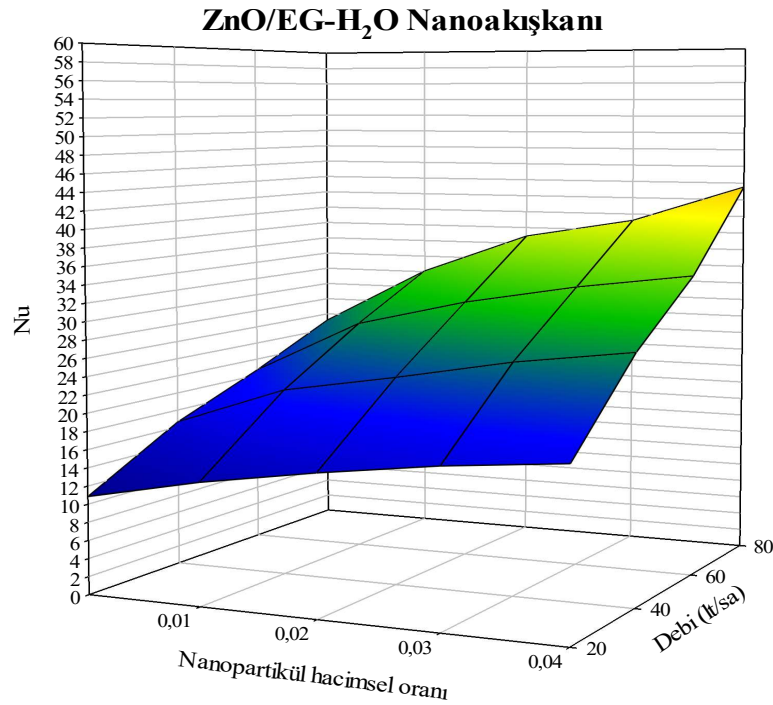
Şekil 7.18. Bejan sayısının farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.



Şekil 7.18. (devam ediyor).

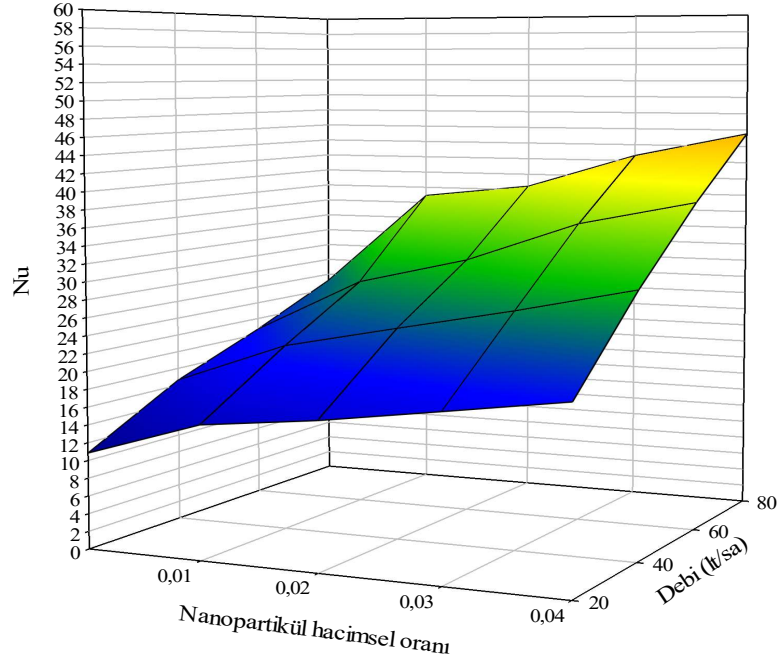
7.2.3. Kanatçıklı Soğurucuda Nanoakışkan ve Hibrit Nanoakışkanların Isı ve Akış Karakteristiklerine Etkisi

Bu bölümde soğurucu boruya eklenen kanatçıkların kolektör verimi ile akış ve ısı transferi üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 7.19’da Nusselt sayısının EG-H₂O, ZnO/EG-H₂O, Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O ve Ag-MgO/EG-H₂O akışkanları için 20 lt/sa, 40 lt/sa, 60 lt/sa ve 80 lt/sa’lik hacimsel debilerde ve %1, %2, %3 ve %4 nanopartikül hacimsel oranlarında değişimleri sunulmaktadır. Kanatçiksız soğurucu durumundaki gibi kanatçıklı soğurucu durumunda da Nusselt sayısı bütün akışkanlar için hacimsel debinin ve nanopartikül oranlarının artışı ile artış eğilimine sahiptir. Maksimum Nusselt sayısına Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanı sahipken, minimum Nusselt sayısına da EG-H₂O baz akışkanı sahiptir. 80 lt/sa debi ve %4 nanopartikül hacimsel oranında Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanı EG-H₂O baz akışkanına göre yaklaşık %130 oranında daha yüksek Nusselt sayısına sahiptir. Bunun nedeni olarak soğurucuya kanatçık eklenmesiyle ısı transfer yüzey alanının artması ve daha iyi termofiziksel özelliklere sahip olan hibrit nanoakışkan kullanılması gösterilebilir.

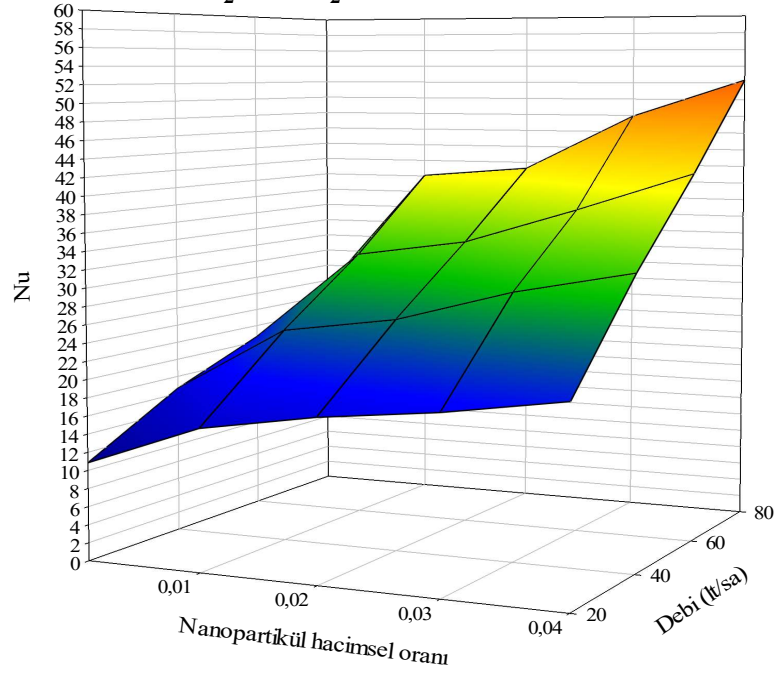


Şekil 7.19. Kanatçıklı soğurucuda Nusselt sayısının farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.

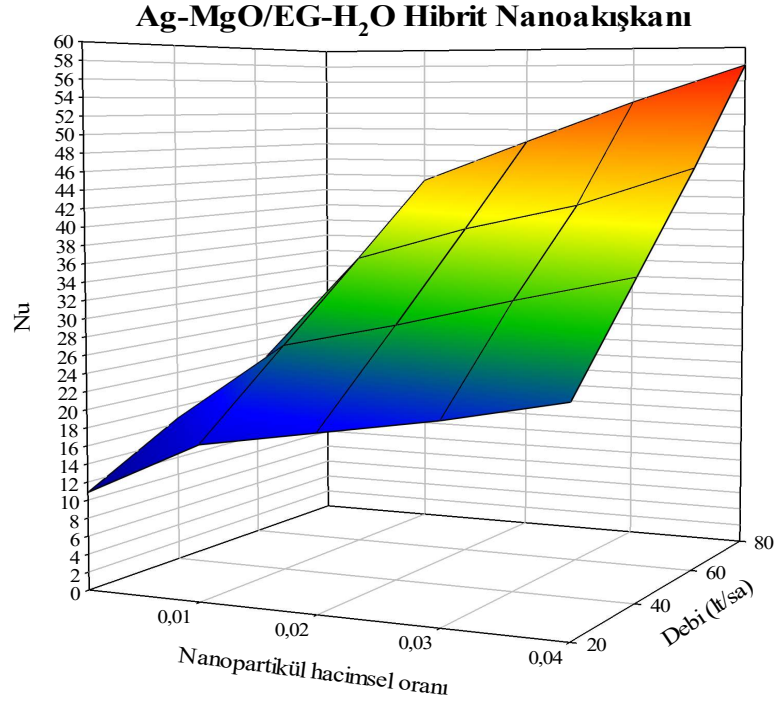
Ag-ZnO/EG-H₂O Hibrit Nanoakışkanı



Ag-TiO₂/EG-H₂O Hibrit Nanoakışkanı

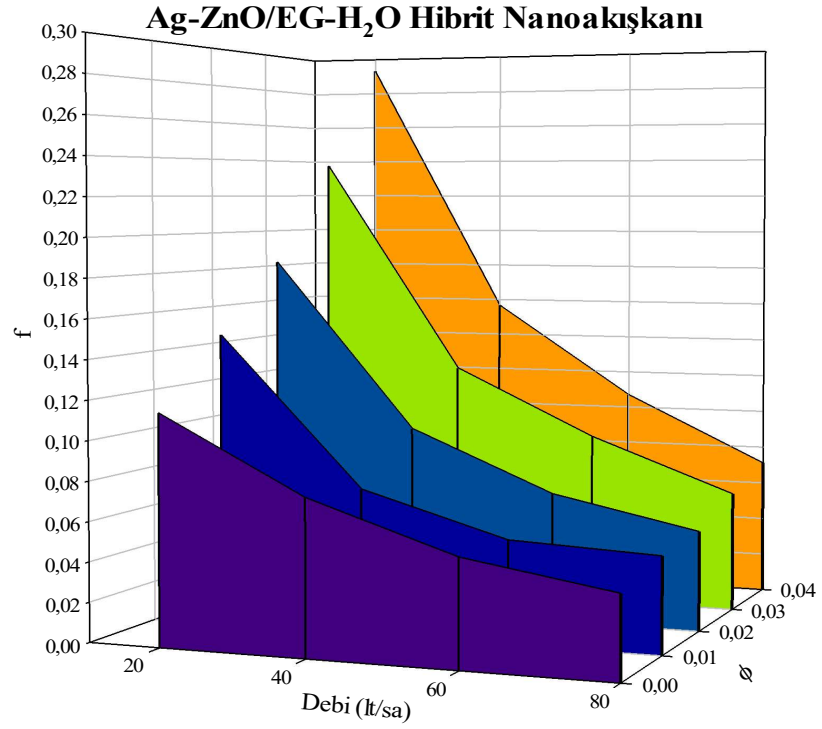
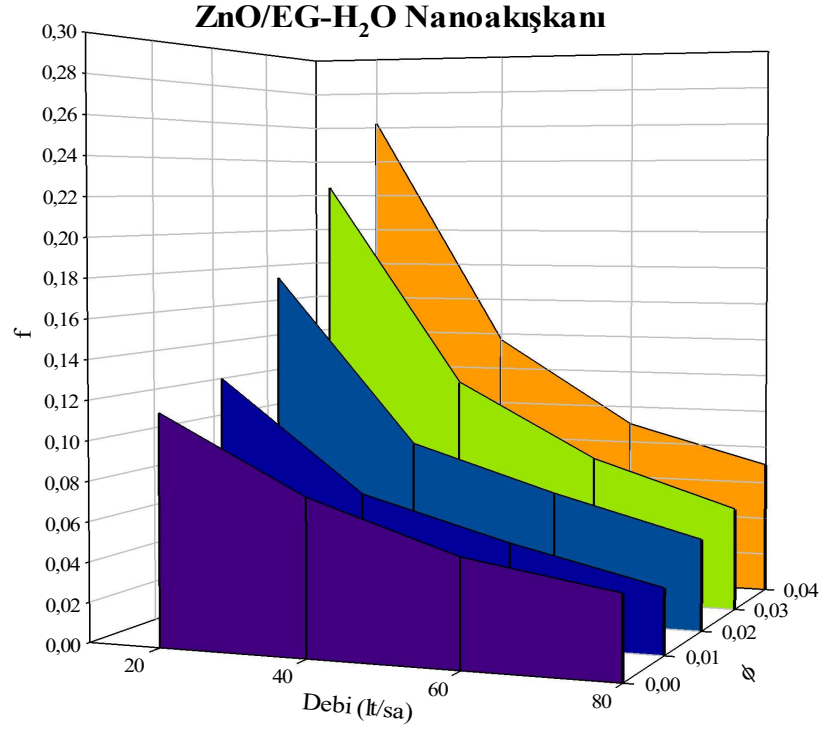


Şekil 7.19. (devam ediyor).

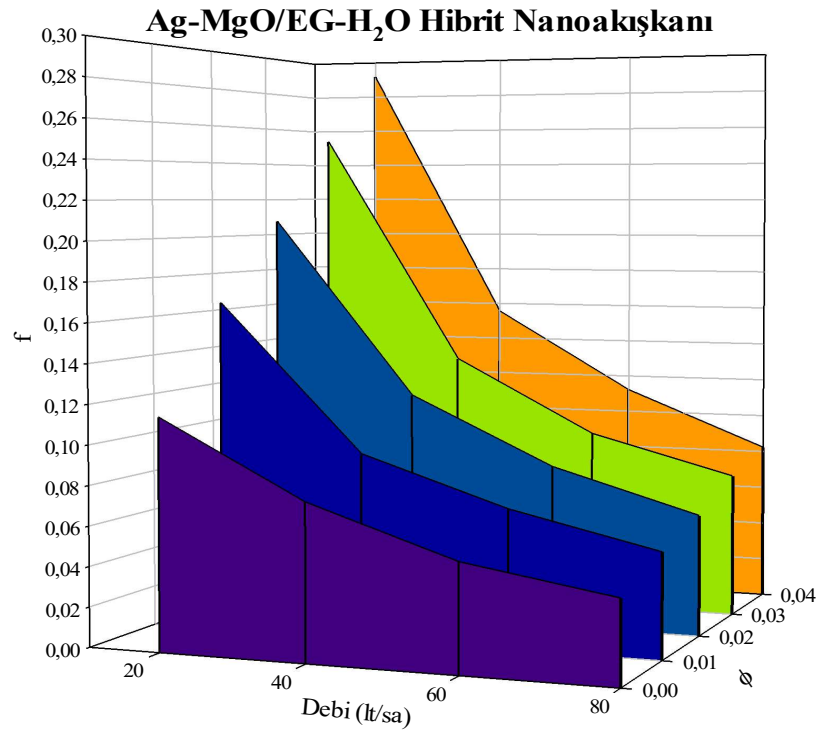
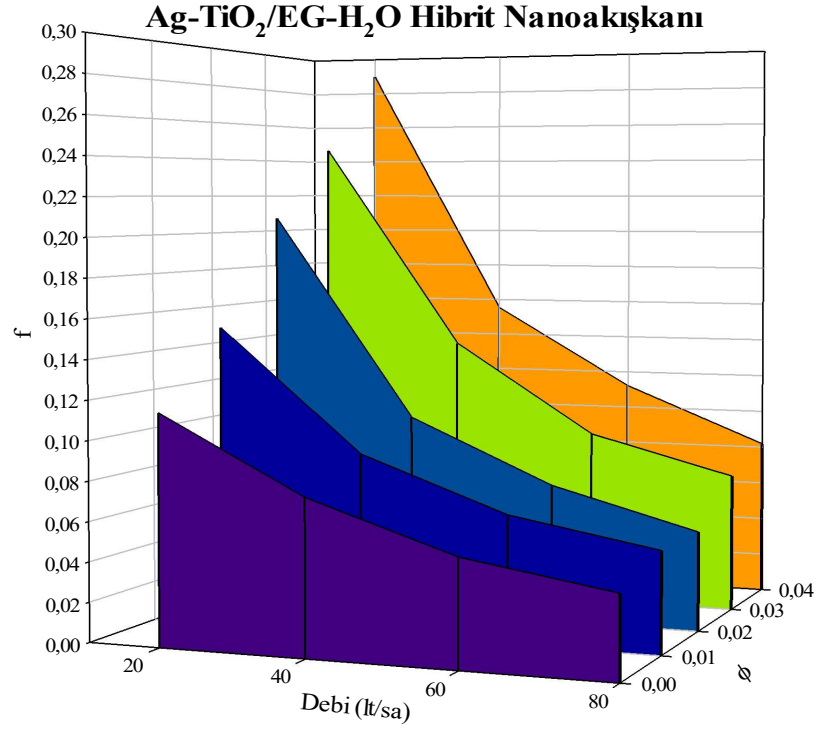


Şekil 7.19. (devam ediyor).

Şekil 7.20’de bir adet tek nanopartiküllü ve üç adet hibrit nanopartiküllü nanokışkanların farklı hacimsel debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki sürtünme faktörü değişimi gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde akışkan hızının başka bir deyişle hacimsel debinin artmasıyla sürtünme faktörü bütün akışkanlarda azalmaktadır. Nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte akışkanın vizkozitesi de artacağından sürtünme faktörü doğal olarak artış göstermektedir. Fakat kanatçıklı soğurucu durumunda sürtünme faktörü, kanatçiksız duruma göre daha fazla artış göstermektedir. Bu durum soğurucuya kanatçık eklenmesiyle yüzey alanı genişletilmesine bağlı olarak akışkanın temas ettiği alanın artırılmış olması olarak açıklanabilir. Farklı çalışma akışkaları için sürtünme faktörü artan sıraya göre ifade edilirse; EG-H₂O, ZnO/EG-H₂O, Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O ve Ag-MgO/EG-H₂O olarak sıralanabilir. Fakat hibrit nanoakışkanların sürtünme faktörü değerleri birbirlerine çok yakındır. Bu durum yüksek ısı transferi kabiliyetine sahip olan hibrit nanoakışkanların POTGÜK üzerinde kullanılmasının verimli olduğunu göstermektedir.



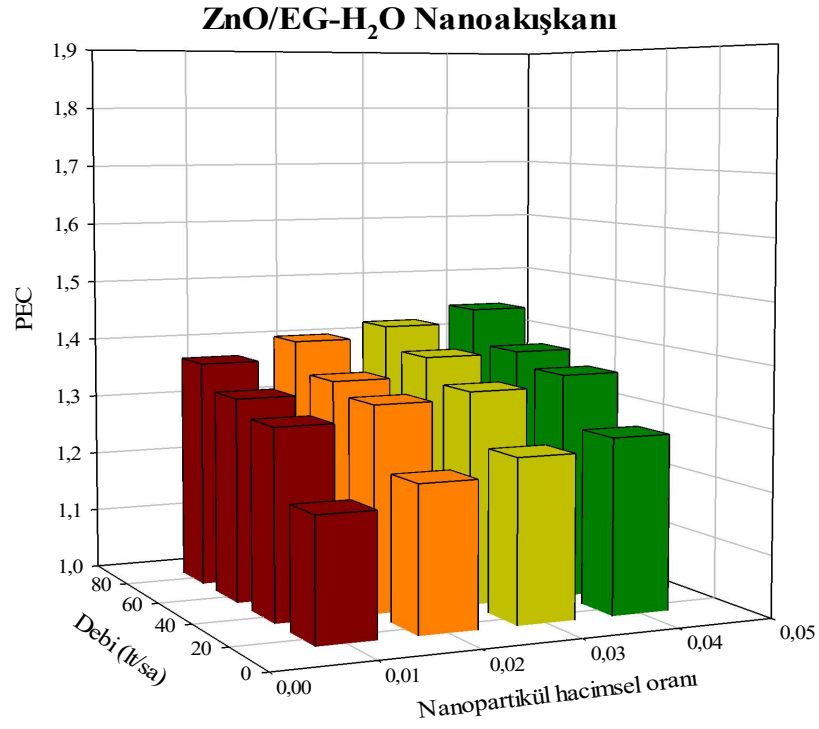
Şekil 7.20. Kanatçıklı soğurucuda sürtünme faktörünün farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.



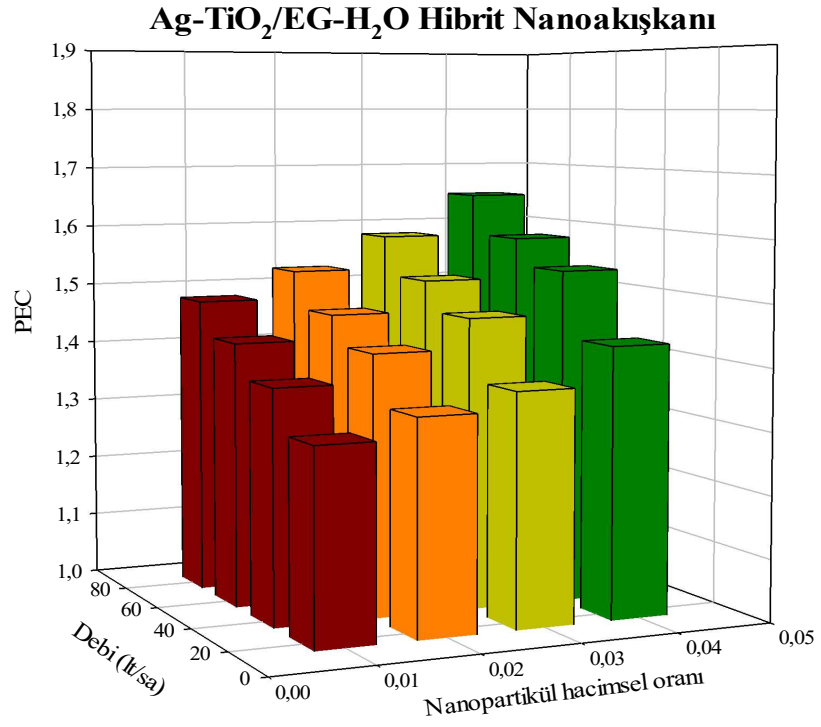
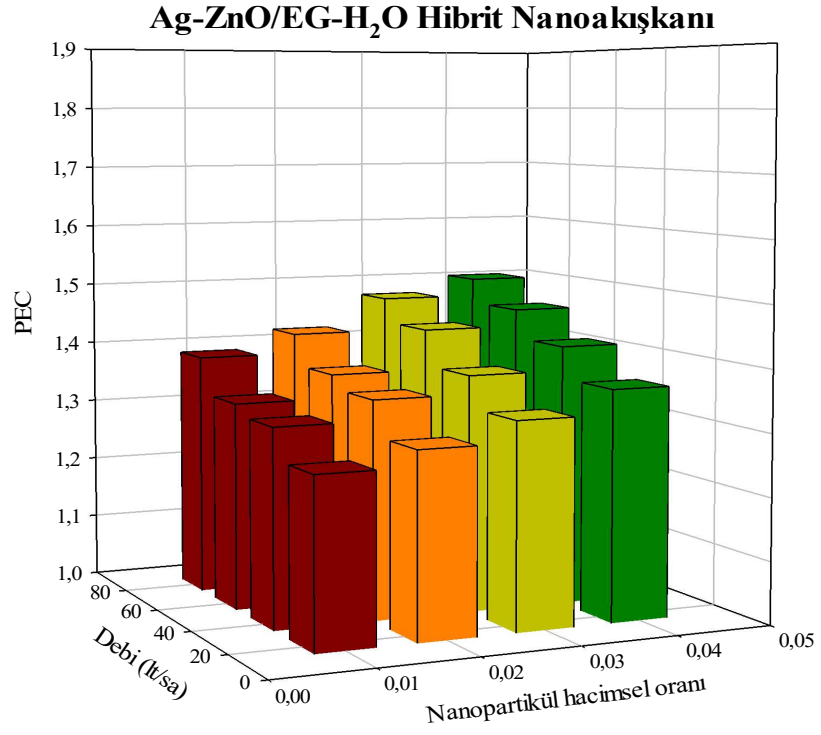
Şekil 7.20. (devam ediyor).

PEC sayısının değişimi, farklı hacimsel debi ve nanopartikül hacimsel oranının fonksiyonu olarak EG-H₂O, ZnO/EG-H₂O, Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O ve

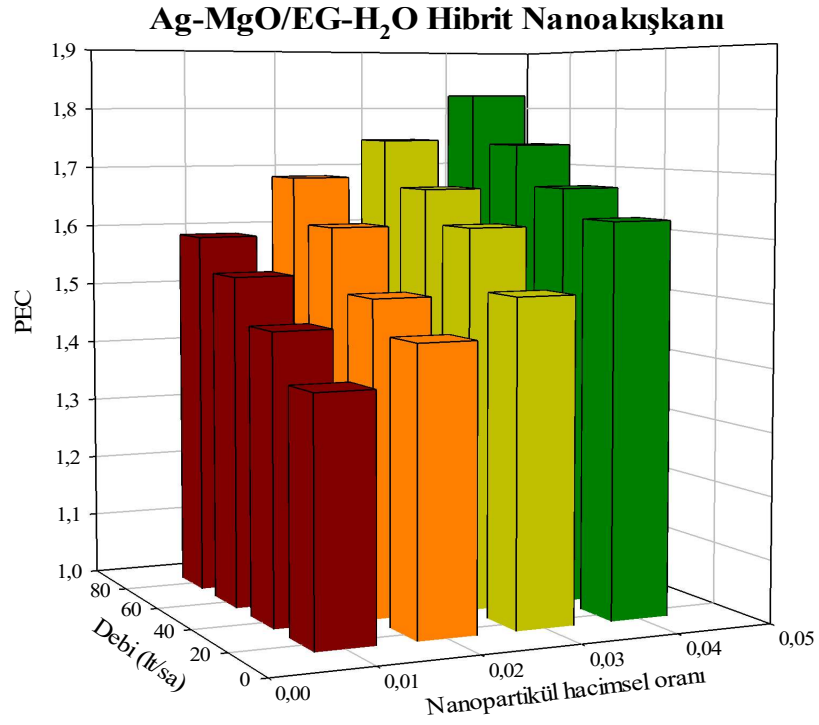
Ag-MgO/EG-H₂O akışkanları için Şekil 7.21’de verilmiştir. Önceki bölümlerde değinildiği üzere PEC sayısının 1’den büyük olması ısı transferi performansının sürtünme performansına baskın olduğu anlamı taşımaktadır. Grafiklerden görüldüğü üzere bütün akışkanlar için PEC sayısı 1’den büyüktür. Fakat soğurucudaki kanatçık ısı transferine büyük katkı sağlamıştır. Aynı şartlar altındaki kanatçıklı soğurucunun PEC sayısı bütün akışkanlarda kanatçıksız soğurucuya göre daha yüksek değere sahiptir. Hacimsel debinin 80 lt/sa ve nanopartikül hacimsel oranının %4 olduğu şartlarda, Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanı EG-H₂O akışkanına göre yaklaşık 1,8 kat daha fazla ısı transferi performansına sahiptir.



Şekil 7.21. Kanatçıklı soğurucuda PEC sayısının farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.

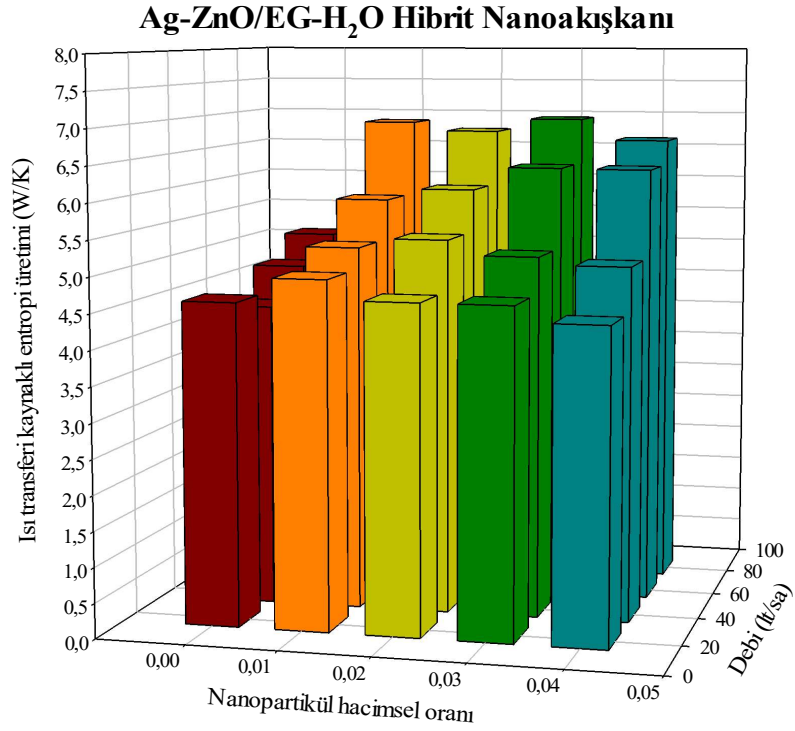
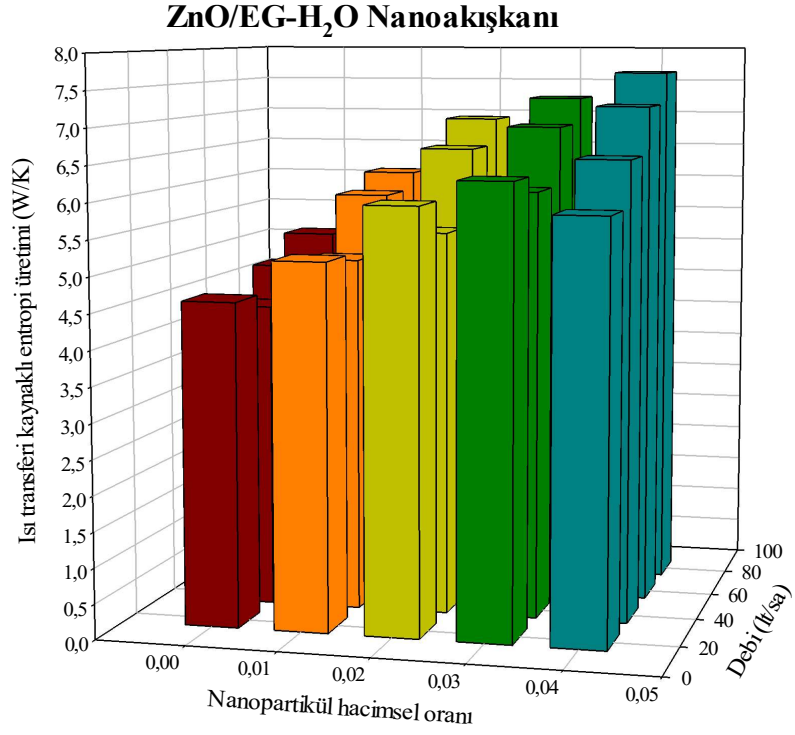


Şekil 7.21. (devam ediyor).

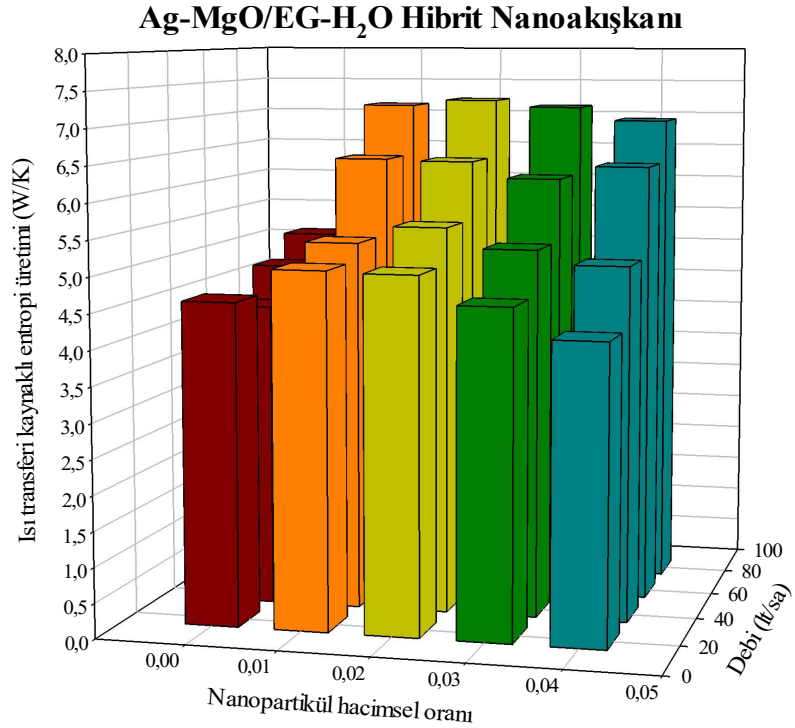
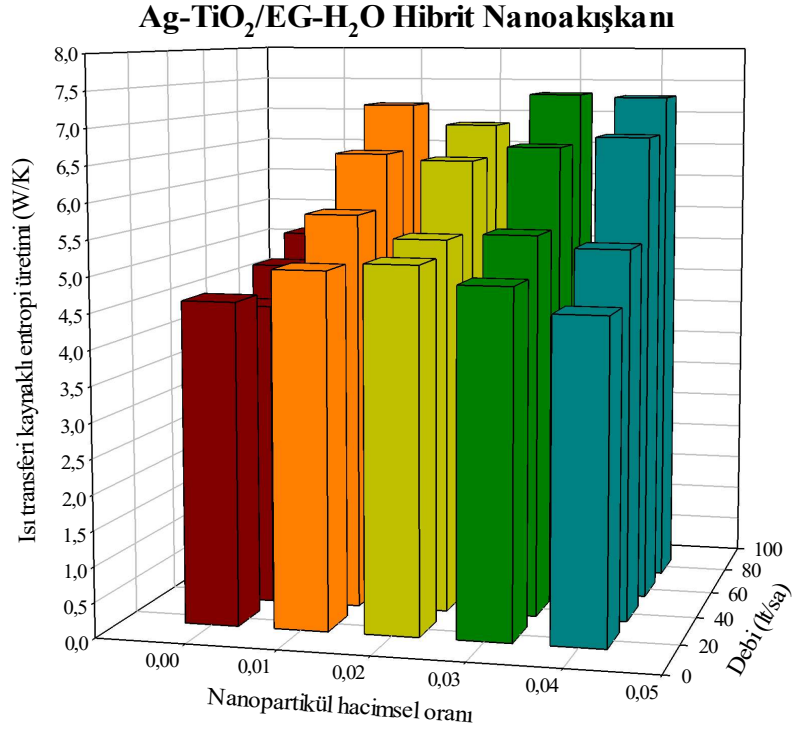


Şekil 7.21. (devam ediyor).

Isı transferinden kaynaklanan entropi üretiminin farklı hacimsel debi ve nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak EG-H₂O, ZnO/EG-H₂O, Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O ve Ag-MgO/EG-H₂O akışkanları için değişimi Şekil 7.22'de sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde hacimsel debinin artmasıyla birlikte genellikle ısı kaynaklı entropi üretimi artmaktadır. Hibrit nanoakışkanların artan nanopartikül hacimsel oranlarında ısı transferi kaynaklı entropi üretimi azalmaktadır. 20 lt/sa hacimsel debide ve %4 nanopartikül hacimsel oranına sahip Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanı aynı şartlardaki diğer akışkanlara göre daha az ısı transferi kaynaklı entropi üretimine sahiptir.



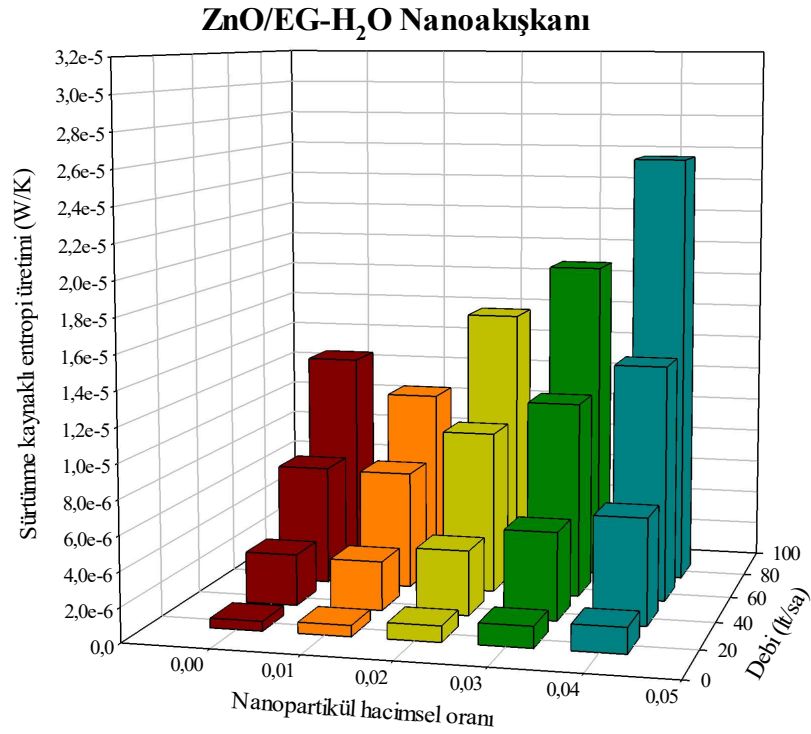
Şekil 7.22. Kanatçıklı soğurucuda ısı transferinden kaynaklanan entropi üretiminin farklı akışkan, debi ve nanopartikel hacimsel oranlarındaki değişimi.



Şekil 7.22. (devam ediyor).

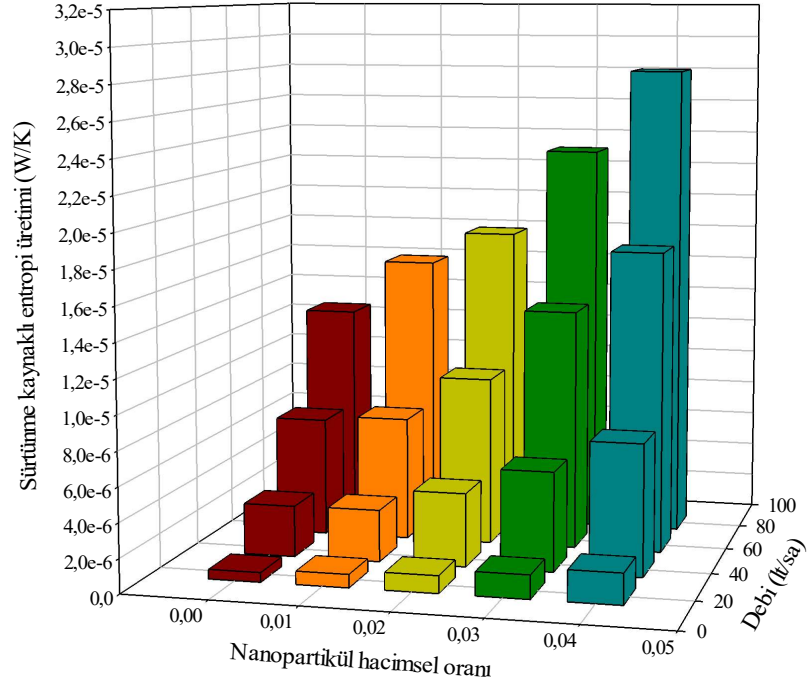
Sürtünmeden kaynaklanan entropi üretiminin farklı hacimsel debi ve nanopartikel hacimsel oranına bağlı olarak EG-H₂O, ZnO/EG-H₂O, Ag-ZnO/EG-H₂O,

Ag-TiO₂/EG-H₂O ve Ag-MgO/EG-H₂O akışkanları için değişimi Şekil 7.23'te sunulmuştur. Sürtünmeden kaynaklanan entropi üretimi nanopartikül hacimsel oranının ve hacimsel debinin artması ile birlikte artış göstermektedir. Bu durumun nedenine önceki bölümlerde değinilmiştir. Kanatçiksız durumdaki en yüksek sürtünme kaynaklı entropi üreten Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanı kanatçıklı durumda da en yüksek entropiyi üretmektedir.

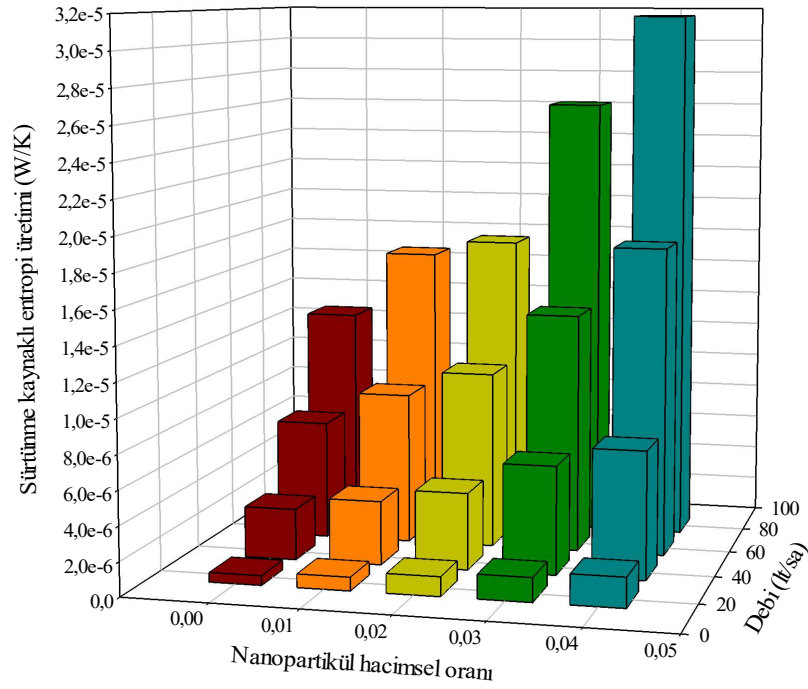


Şekil 7.23. Kanatçıklı soğurucuda sürtünmeden kaynaklanan entropi üretiminin farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.

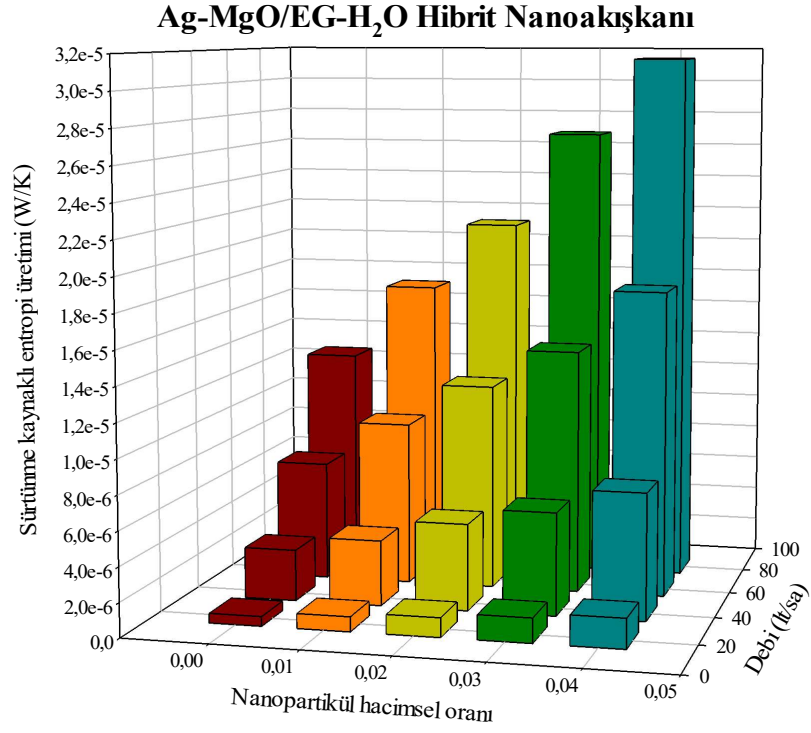
Ag-ZnO/EG-H₂O Hibrit Nanoakışkan



Ag-TiO₂/EG-H₂O Hibrit Nanoakışkan

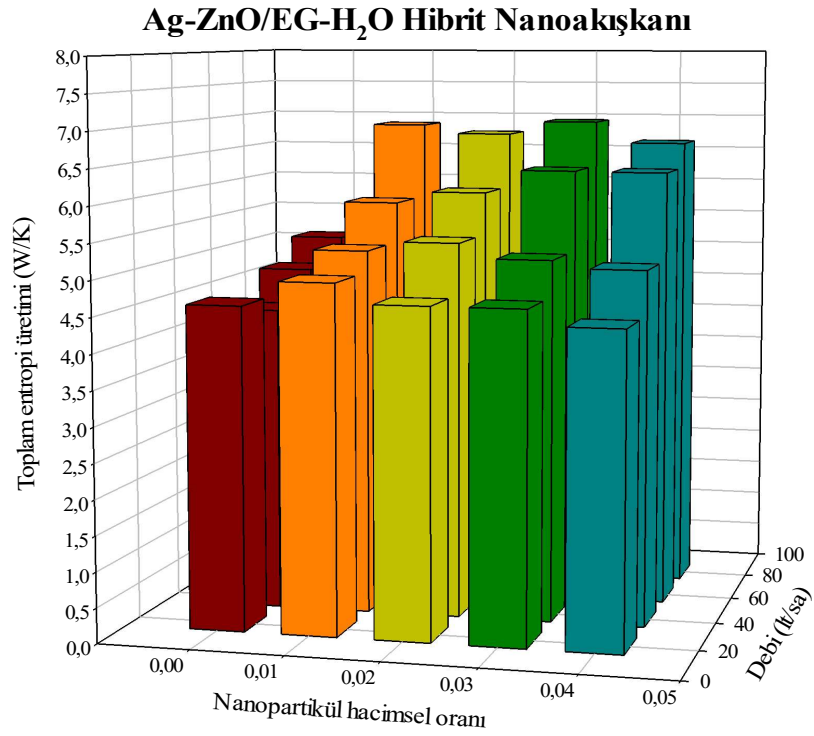
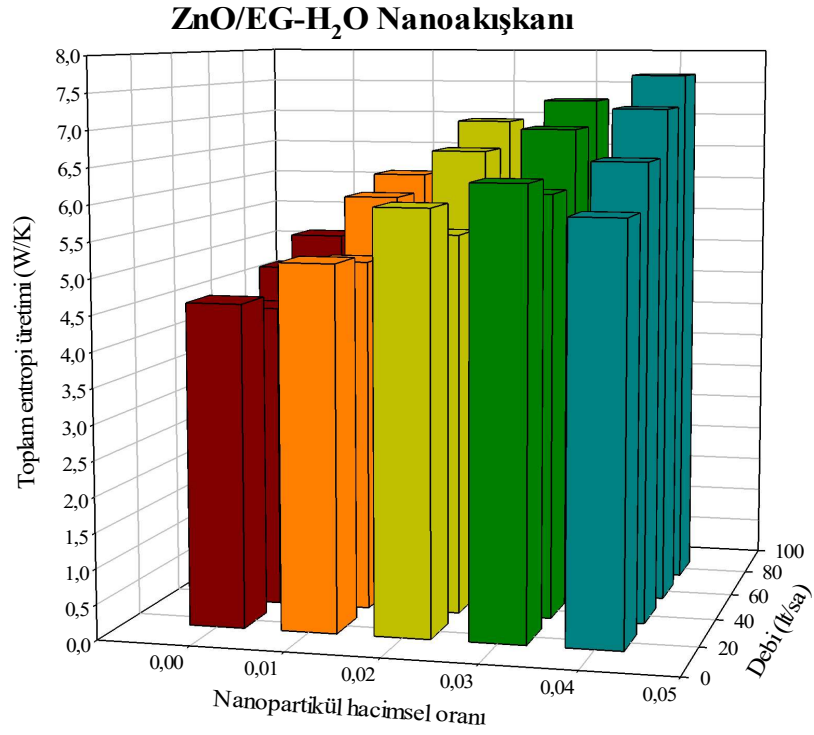


Şekil 7.23. (devam ediyor).

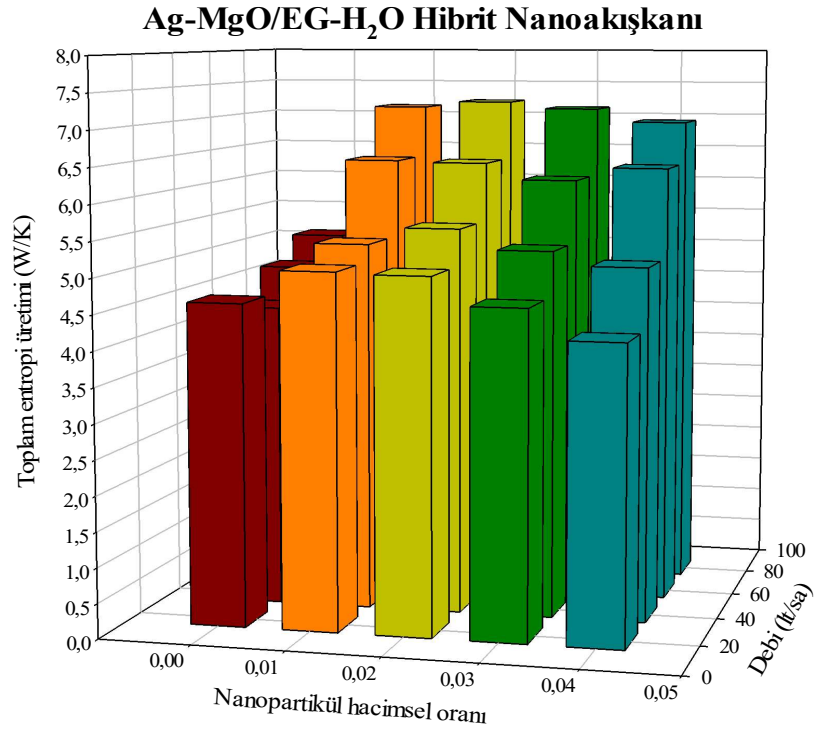
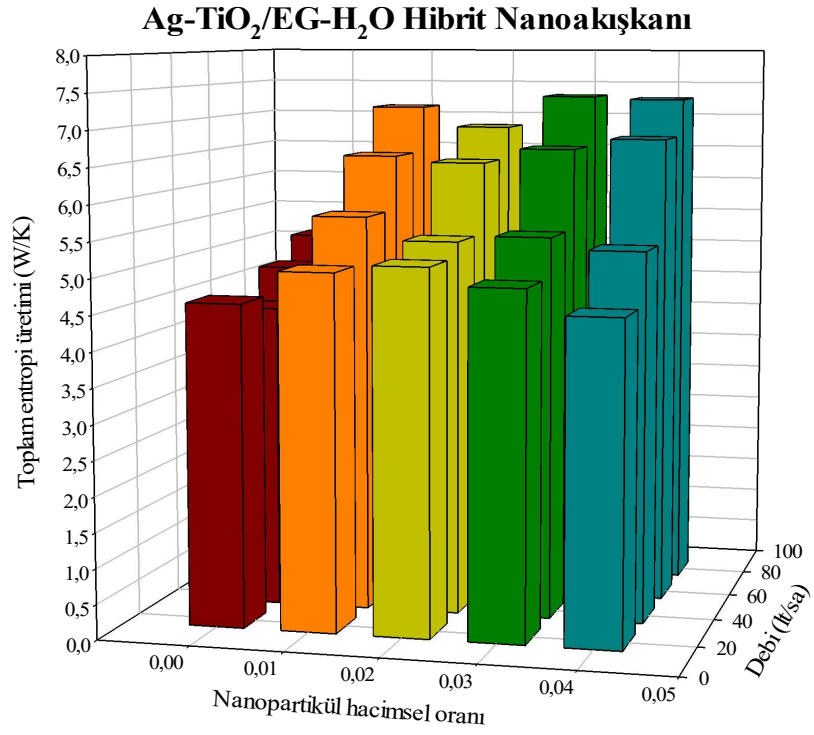


Şekil 7.23. (devam ediyor).

Toplam entropi üretiminin farklı hacimsel debi ve nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak EG-H₂O, ZnO/EG-H₂O, Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O ve Ag-MgO/EG-H₂O akışkanları için değişimi Şekil 7.24'te sunulmuştur. Isı transferinden kaynaklanan entropi üretimi sürtünme kaynaklı entropi üretiminden büyük olduğundan yukarıda verilen kanatçıklı soğurucuda ısı transferi kaynaklı entropi üretimi ile aynı değişime sahiptir.

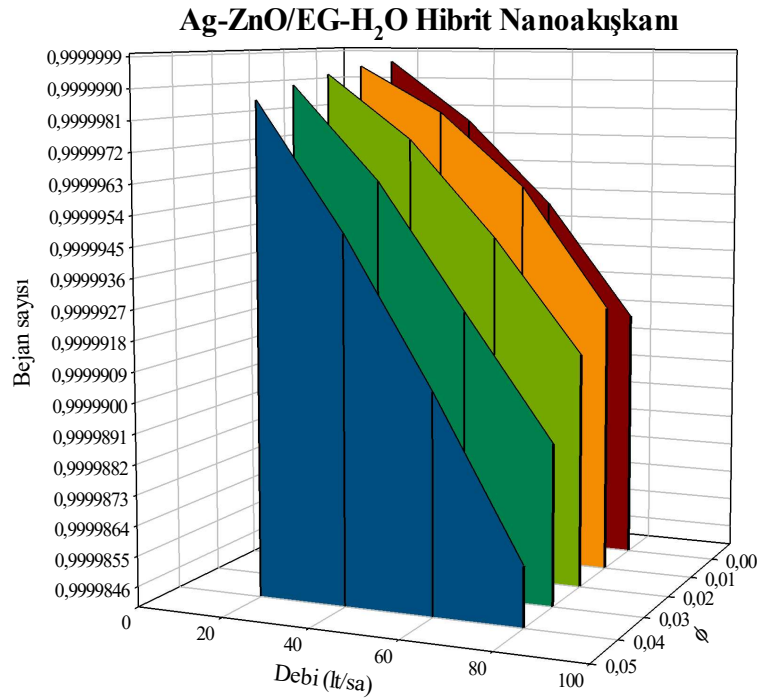
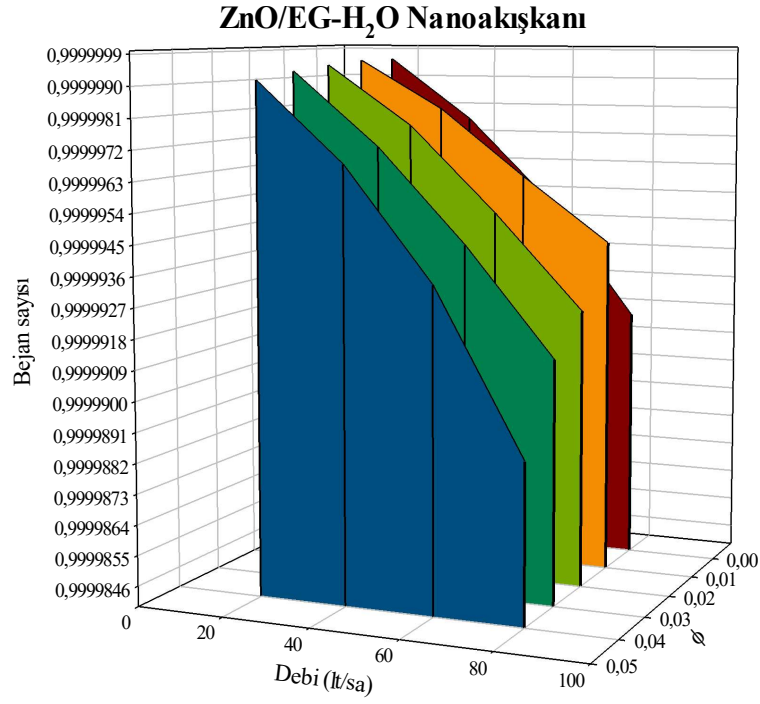


Şekil 7.24. Kanatçıklı soğurucuda toplam entropi üretiminin farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.



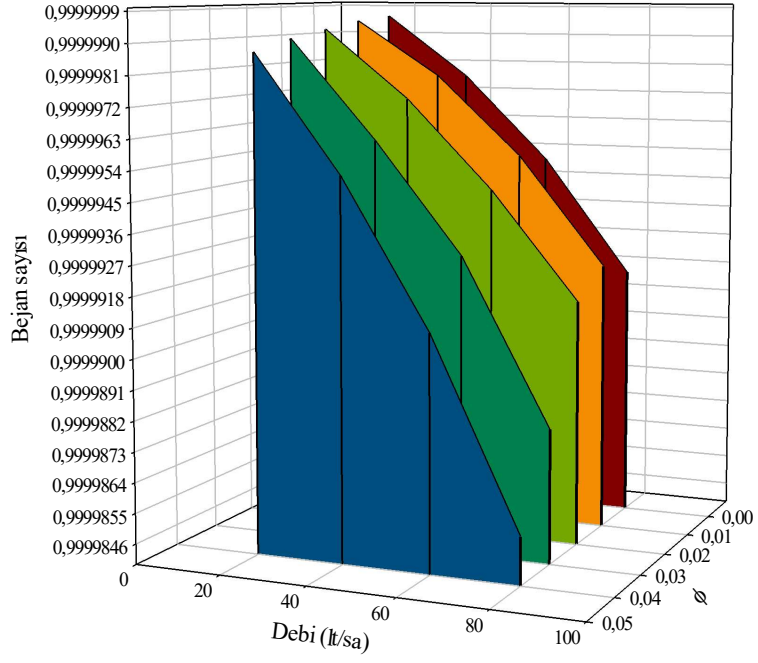
Şekil 7.24. (devam ediyor).

Şekil 7.25'te Bejan sayısının tek nanopartiküllü ve hibrit nanopartiküllü nanoakışkanları için farklı debilerde ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki dağılımları verilmiştir. Hacimsel debinin artışıyla az da olsa Bejan sayısı azalmaktadır.

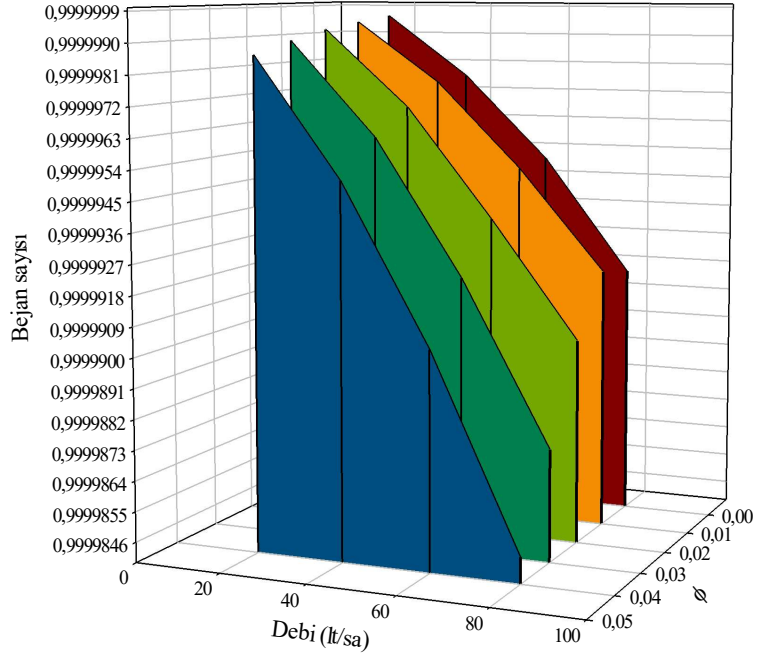


Şekil 7.25. Kanatçıklı soğurucuda Bejan sayısının farklı akışkan, debi ve nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi.

Ag-TiO₂/EG-H₂O Hibrit Nanoakışkan



Ag-MgO/EG-H₂O Hibrit Nanoakışkan

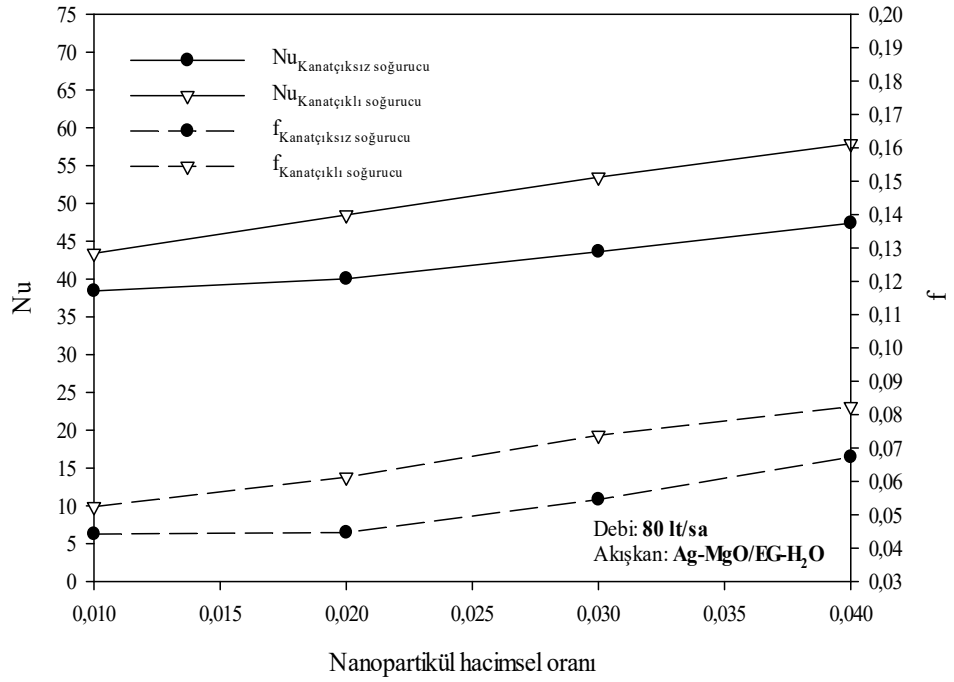


Şekil 7.25. (devam ediyor).

7.2.4. Soğurucuya Kanatçık Eklenmesinin Isı ve Akış Karakteristiklerine Etkisinin Ag-MgO/EG-H₂O Hibrit Nanoakışkanı Kullanımı ile İncelenmesi

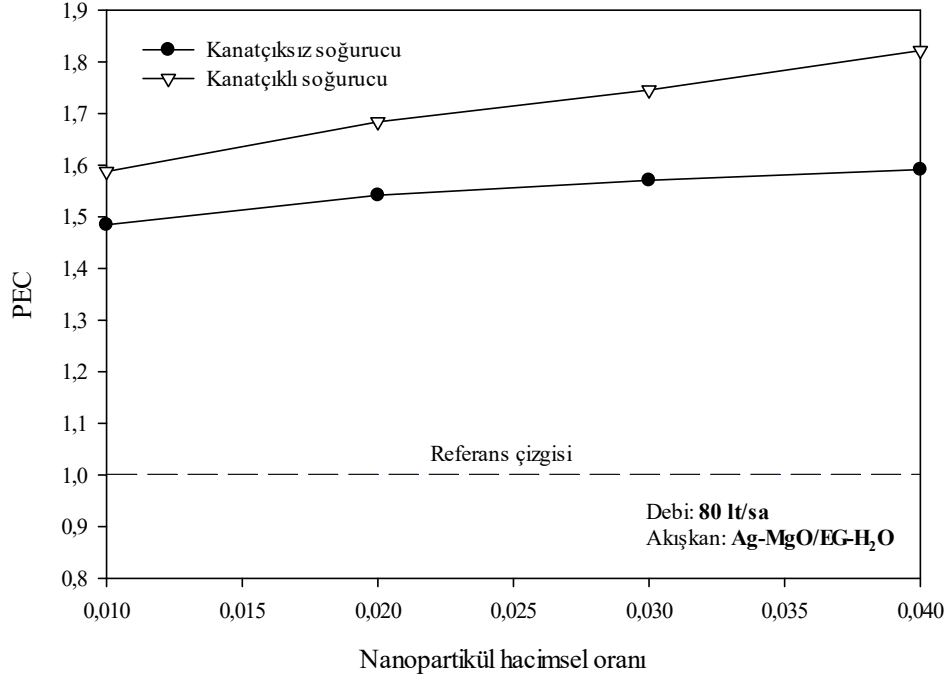
Buraya kadarki sonuçlar değerlendirildiğinde ısı performans açısından en uygun hacimsel debinin 80 lt/sa ve en iyi çalışma akışkanının Ag-MgO/EG-H₂O olduğu tespit edilebilir. İşte bu debi ve çalışma akışkanı kullanılarak soğurucunun kanatçiksiz ve kanatçıklı durumlarında farklı parametreler ile karşılaştırma yapılarak önceki bölümlerde elde edilen sonuçların daha anlaşılabilir olması bu bölümde amaçlanmıştır.

Soğurucunun kanatçıklı ve kanatçiksiz durumlarındaki Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanının 80 lt/sa hacimsel debide kullanımı halindeki değişimi farklı nanopartikül hacimsel oranlarına bağlı olarak Şekil 7.26'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, kanatçıklı durumdaki Nusselt sayısının kanatçiksiz duruma göre üstünlüğü açıkça görülmektedir. Bunun nedeni olarak kanatçıklı durumda ısı sınır tabaka kalınlığının azalmasına bağlı olarak ısı transferinin daha hızlı olması olarak açıklanabilir. Nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla beraber kanatçıklı ve kanatçiksiz durumdaki Nusselt sayısı farkı artış göstermektedir. %4 nanopartikül hacimsel oranında kanatçıklı durumdaki Nusselt sayısı kanatçiksiz duruma göre yaklaşık %24 oranında artış gösterirken, %1 nanopartikül hacimsel oranında ise yaklaşık %13 oranında artış göstermektedir. Ayrıca, kanatçıklı durumda bütün nanopartikül hacimsel oranlarında sürtünme faktörü kanatçiksiz duruma göre daha yüksektir. Bunun nedeni ise kanatçıklı durumda akışkan daha çok yüzeye temas etmesidir. Isı transferinin en yüksek olduğu %4 nanoaprtikül oranında kanatçıklı durumda sürtünme faktörü kanatçiksiz duruma göre yaklaşık %19 oranında daha yüksektir.



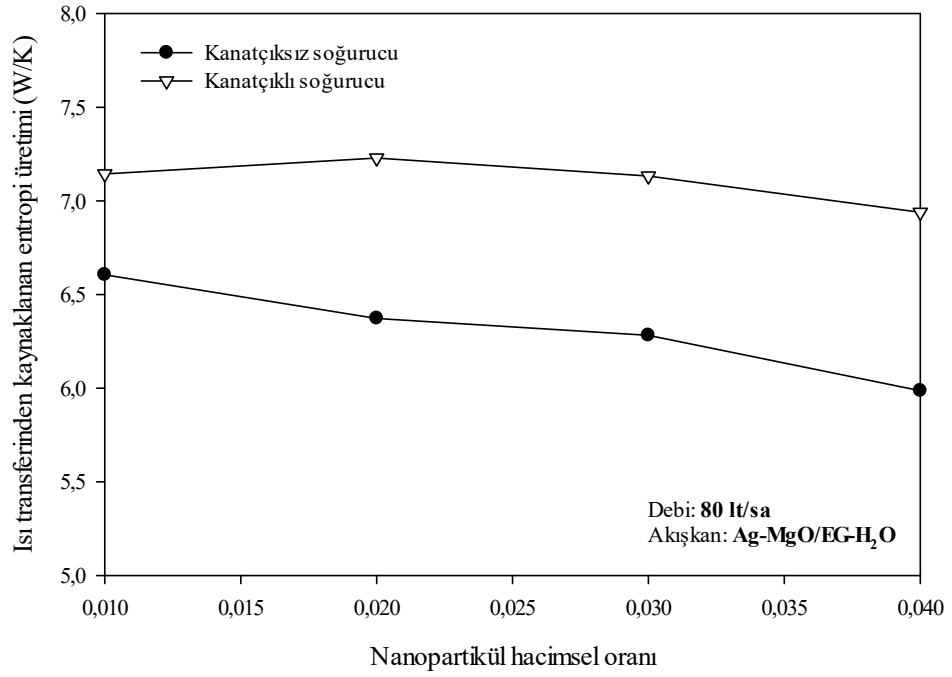
Şekil 7.26. Soğurucunun kanatçıklı ve kanatçiksız durumlarında Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi.

Şekil 7.27’de soğurucuya kanatçık eklenmesi durumunda farklı nanopartikül hacimsel oranlarına bağlı olarak sabit 80 lt/sa debide Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanının kullanılmasıyla PEC sayısının değişimi sunulmuştur. PEC sayısı kanatçıklı ve kanatçiksız durumda nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte artış göstermektedir. PEC sayısı, bütün durumlarda ısı karakteristیکlerin hidrodinamik karakteristیکlere göre üstün olduğundan 1’den büyüktür. Yukarıda değinildiği üzere kanatçıklı durumda sürtünme faktörü artmaktaydı fakat ısı transfer performansı daha yüksek olduğu için PEC sayısı kanatçiksız duruma göre ortalama olarak yaklaşık %12 daha yüksek çıkmıştır.

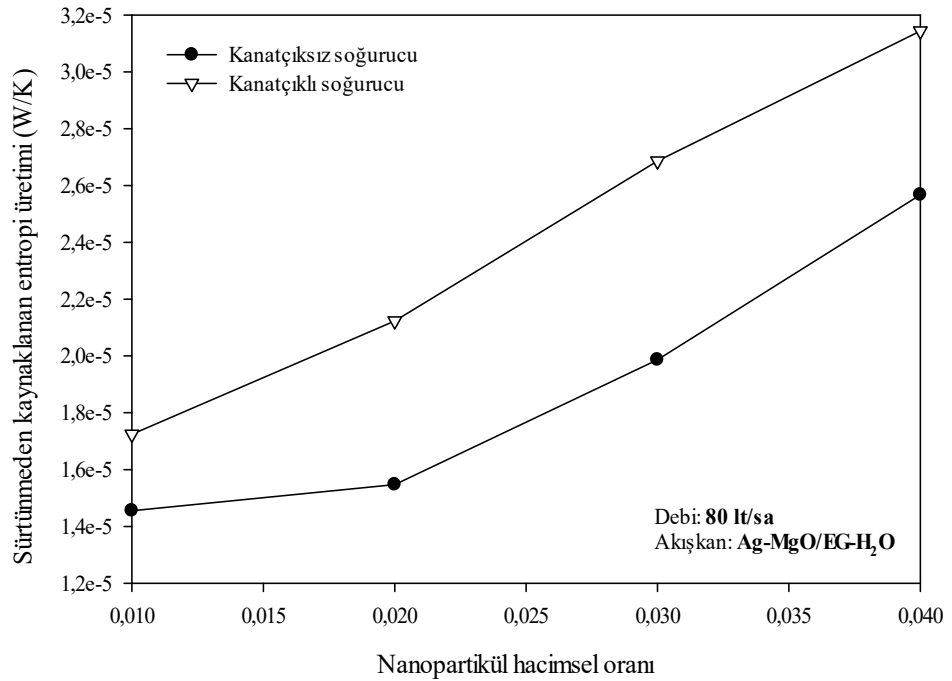


Şekil 7.27. Soğurucunun kanatçıklı ve kanatçiksız durumlarında PEC sayısının nanopartikel hacimsel oranı ile değişimi.

Şekil 7.28(a), (b) ve (c)'de ise ısı transferinden, sürtünmeden kaynaklanan ve toplam entropi üretiminin farklı nanopartikel hacimsel oranlarındaki değişimi soğurucuda kanatçık olup olmama durumuna göre, Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanı için 80 lt/sa hacimsel debide gösterilmiştir. Kanatçıklı durumda, ısı transferi ve sürtünme faktörü kanatçiksız duruma göre yüksek olduğundan ısı transferinden ve sürtünmeden kaynaklı entropi üretimi daha yüksektir. Fakat kanatçıklı durumda ısı transfer performansı sürtünme performansından daha yüksektir (PEC sayısı ile görülebilmektedir.). Bu nedenle kanatçıklı durumda, kanatçiksız duruma göre toplam entropi üretimi, ısı transferinden kaynaklanan entropi üretiminin fazlalılığından dolayı daha yüksektir.

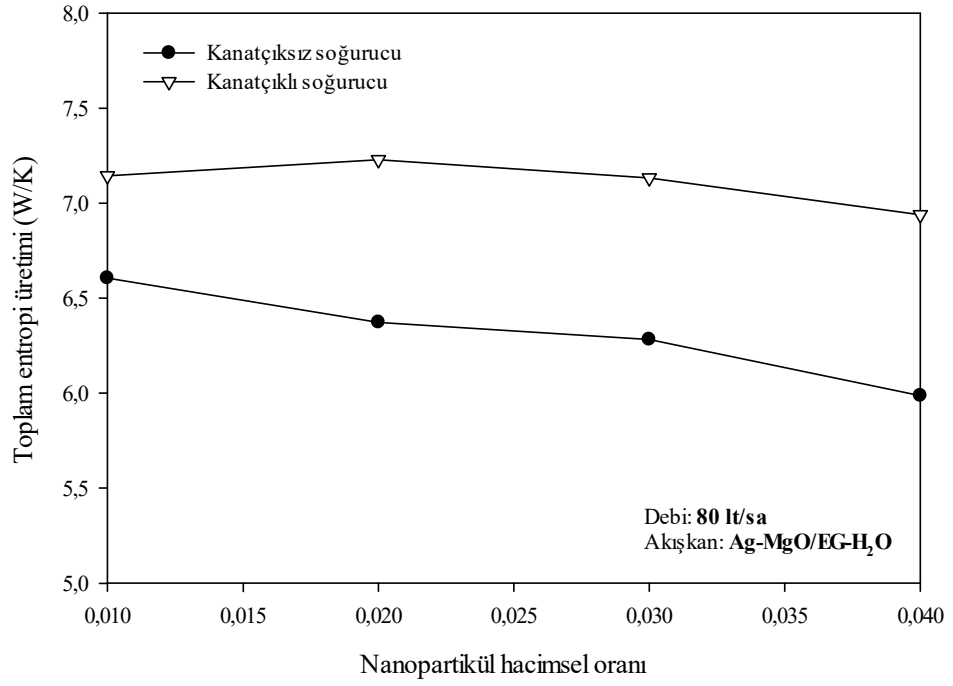


(a)



(b)

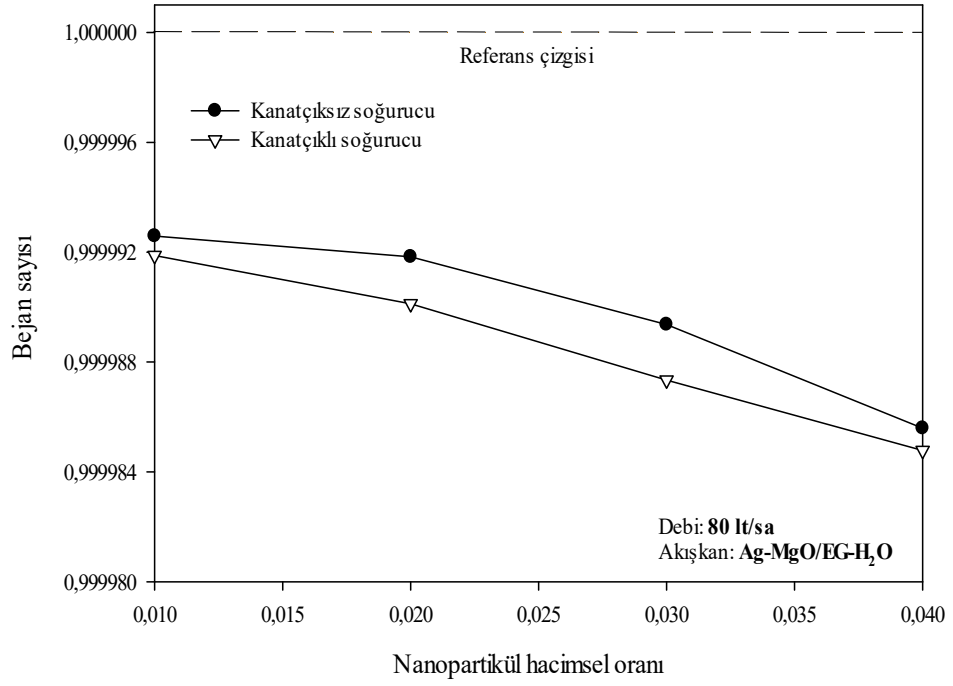
Şekil 7.28. Soğurucunun kanatçıklı ve kanatçıksız durumlarında (a) ısı transferinden kaynaklanan, (b) sürtünmeden kaynaklanan, (c) toplam entropi üretiminin nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi.



(c)

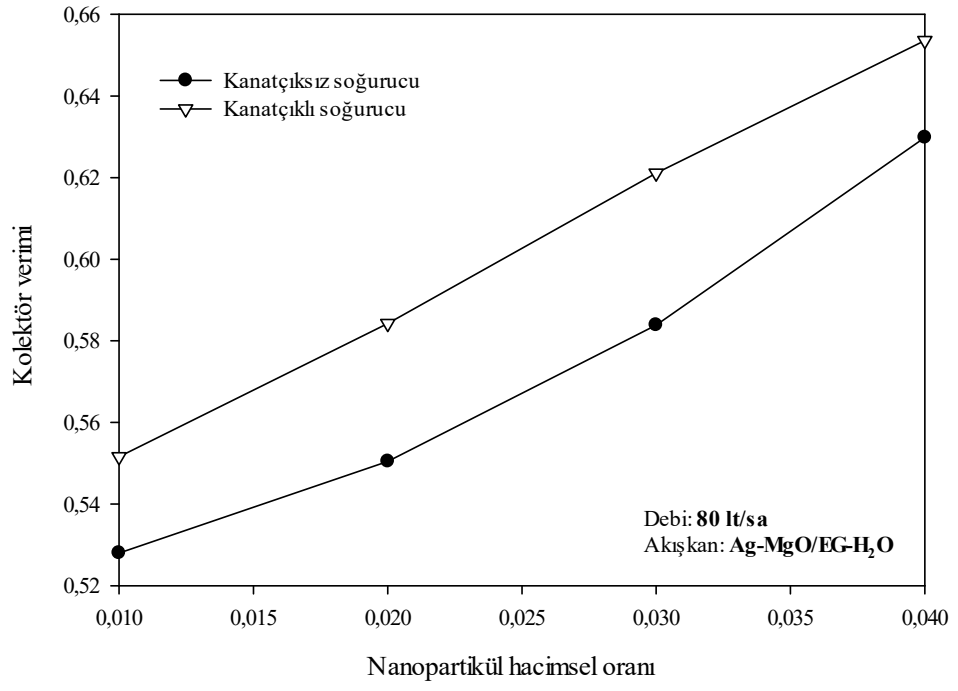
Şekil 7.28. (devam ediyor).

Şekil 7.29’da Bejan sayısının farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi soğurucuda kanatçık olup olmama durumuna göre, Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanı için 80 lt/sa hacimsel debide gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, Bejan sayısı çok küçük farklarla kanatçıklı durumda kanatçiksız duruma göre düşüktür. Bunun nedeni ise kanatçıklı durumda sürtünmeden kaynaklı entropinin kanatçiksız duruma göre biraz daha yüksek olmasıdır.



Şekil 7.29. Soğurucunun kanatçıklı ve kanatçiksız durumlarında Bejan sayısının nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi.

Şekil 7.30'da kolektör veriminin farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki değişimi kanatçıklı ve kanatçiksız soğurucu durumuna göre, Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanı için 80 lt/sa hacimsel debide gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde kanatçıklı soğurucu durumunda kolektör veriminin daha yüksek olduğu saptanmıştır.



Şekil 7.30. Soğurucunun kanatçıklı ve kanatçiksız durumlarında kolektör veriminin nanopartikül hacimsel oranı ile değişimi.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma deneysel ve sayısal olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada bir POTGÜK tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu POTGÜK üzerinde iki farklı ısı transfer akışkanı (EG-H₂O ve ZnO/EG-H₂O) kullanımının dört farklı debide (20 lt/sa, 40 lt/sa, 60 lt/sa ve 80 lt/sa) kolektör verimine etkisi laminar akış rejiminde incelenmiştir.

Deneysel çalışmada, ölçülen güneş ışınım şiddeti, rüzgâr hızı ve çalışma akışkanının giriş-çıkış sıcaklıklarına bağlı olarak kolektör faydalı enerjisi ve verimi detaylı şekilde incelenmiştir. Ayrıca kolektörler için önemli olan soğurulan enerji parametresi, atılan enerji parametresi gibi parametreler de incelenmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- (a) %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı kullanılması durumunda faydalı enerjinin EG-H₂O baz akışkanı kullanılan duruma göre 20 lt/sa ve 80 lt/sa debilerinde %150 ve %73,9 oranında arttığı görülmüştür. Faydalı enerjinin güneş ışınım şiddeti ve hacimsel debi artışıyla doğru orantılı olarak değiştiği saptanmıştır. Ayrıca, ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla faydalı enerjinin de artış gösterdiği saptanmıştır.
- (b) Nanopartikül hacimsel oranının ve hacimsel debinin artmasıyla birlikte soğurulan enerji parametresinde artış olduğu saptanmıştır.
- (c) Atılan enerji parametresi, hacimsel debilerin 20 lt/sa, 40 lt/sa ve 60 lt/sa olduğu durumlarda nanopartikül hacimsel oranının %1 olmasına kadar artış göstermiştir. %1'den %4'e kadar atılan enerji parametresinin neredeyse sabit kaldığı

görülmüştür. %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı kullanılması durumunda atılan enerji parametesinin EG-H₂O baz akışkanına göre daha az olduğu saptanmıştır.

(d) 80 lt/sa debide EG-H₂O akışkanı kullanılması durumunda ısı alma faktörü 20 lt/sa debiye göre %50 artış gösterirken, toplam ısı transfer katsayısı %4,79 azalmıştır. Aynı şartlarda, %4 ZnO/EG-H₂O nanoakışkanının kullanılması durumunda ise ısı alma faktörü %40 artmış, toplam ısı transfer katsayısının ise %19,37 oranında azaldığı saptanmıştır.

(e) Deneysel çalışmada kullanılan bütün ısı transfer akışkanlarında hacimsel debinin artmasıyla birlikte kolektöre giriş-çıkış sıcaklık farkı azalmıştır. Hacimsel debi arttıkça kolektör verimi artmıştır. Kolektöre giriş-çıkış sıcaklık farkı ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı kullanıldığında baz akışkanı göre arttığı saptanmıştır.

(f) Kaybolan enerjinin nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla azalış eğilimi gösterdiği saptanmıştır.

Sayısal çalışmada ise, deneysel çalışma koşullarında POTGÜK için sayısal çözümler yapılmıştır. Sayısal analizde ANSYS Fluent 19,0 ticari programı kullanılmıştır. Sayısal analizlerde deneysel çalışmada kullanılan akışkanlara ek olarak üç farklı tip hibrit nanoakışkan olan Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O ve Ag-MgO/EG-H₂O kullanılmıştır. Bütün analizlerde hacimsel debi olarak 20 lt/sa, 40 lt/sa, 60 lt/sa, 80 lt/sa ve nanopartikül hacimsel oranı olarak %1, %2, %3, %4 kullanılmıştır. Ek olarak, soğurucu boruya akış yönünde iki adet kanatçık eklenerek sayısal analizler devam ettirilmiştir. Sayısal çalışmada, POTGÜK alıcısına homojen olmayan ısı akışı sınır koşulu verilerek gerçek şartlara en yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Sayısal çalışmada, soğurucunun kanatçiksız ve kanatçıklı durumlarında Nusselt sayısı, sürtünme faktörü, PEC sayısı, ısı transferi ve sürtünme kaynaklı entropi üretimi, toplam entropi üretimi ve Bejan sayısı parametreleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sayısal analiz sonuçları aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- (a) Soğurucunun kanatçıklı ve kanatçıksız durumunda Nusselt sayısı bütün ısı transfer akışkanlarında hacimsel debinin ve nanopartikül hacimsel oranın artmasıyla artış gösterdiği belirlenmiştir. Tek nanopartiküllü olan ZnO/EG-H₂O nanoakışkanı ve hibrit nanopartiküllü olan Ag-ZnO/EG-H₂O, Ag-TiO₂/EG-H₂O ve Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanları EG-H₂O baz akışkanına göre daha yüksek Nusselt sayısına sahip olduğu saptanmıştır. Fakat hibrit nanoakışkanların da ZnO/EG-H₂O nanoakışkanına göre %17,1'e varan daha yüksek Nusselt sayısına sahip oldukları tespit edilmiştir. Maksimum Nusselt sayısı Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanının 80 lt/sa'lik hacimsel debisinde ve %4 nanopartikül hacimsel oranında elde edilmiştir.
- (b) Soğurucunun kanatçıksız ve kanatçıklı durumunda sürtünme faktörü hacimsel debinin artmasıyla azalmakta olduğu nanopartikül hacimsel oranın artmasıyla artmakta olduğu görülmüştür. Bütün nanoakışkanların EG-H₂O baz akışkanına göre daha yüksek sürtünme faktörüne sahip olduğu saptanmıştır. En yüksek sürtünme faktörü Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanında görülmüştür.
- (c) Soğurucunun kanatçıksız ve kanatçıklı durumunda PEC sayısı bütün ısı transfer akışkanlarında 1'den büyük olduğu saptanmıştır. Hacimsel debinin ve nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla PEC sayısının da artış gösterdiği belirlenmiştir. PEC sayısının en yüksek Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanında, en düşük ise EG-H₂O baz akışkanında olduğu saptanmıştır.
- (d) Soğurucunun kanatçıksız ve kanatçıklı durumunda ısı transferinden kaynaklı entropi üretiminin bütün ısı transfer akışkanlarında nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla azalmakta olduğu hacimsel debinin artmasıyla artmakta olduğu görülmüştür. En yüksek ısı transferi kaynaklı entropi üretimi ZnO/EG-H₂O nanoakışkanında görülürken en düşüğü ise Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanında olduğu belirlenmiştir.
- (e) Soğurucunun kanatçıksız ve kanatçıklı durumunda sürtünmeden kaynaklı entropi üretiminin hem hacimsel debinin hem de nanopartikül hacimsel debinin artışıyla beraber artmakta olduğu görülmüştür. Fakat bu artış üzerinde hacimsel debinin

daha etkili olduğu farkedilmiştir. Viskozitenin artışına paralel olarak en yüksek sürtünmeden kaynaklı entropi üretimi Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanında olduğu saptanmıştır.

- (f) Soğurucunun kanatçiksız ve kanatçıklı durumunda toplam entropi üretiminin ısı transferinden kaynaklanan entropi üretimi ile aynı değışimi göstermekte olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni ise sürtünmeden kaynaklı entropi üretiminin, ısı transferi kaynaklı entropi üretiminden çok daha düşük olmasıdır.
- (g) Soğurucunun kanatçiksız ve kanatçıklı durumunda Bejan sayısının bütün kullanılan akışkanlarda nanopartikül hacimsel oranın artmasıyla beraber azalmakta olduğu görülmüştür. Ayrıca, bütün akışkanlarda Bejan sayısının 1'e yakın olduğu saptanmıştır.
- (h) Nusselt sayısının, sürtünme faktörünün, PEC sayısının ve entropi üretimlerinin soğurucunun kanatçıklı olması durumunda kanatçiksız durumuna göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Kanatçıklı durumda 80 lt/sa hacimsel debide ve Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanının kullanılmasıyla Nusselt sayısının kanatçiksız duruma göre %24'e, sürtünme faktörünün %19'a ve PEC sayısının %12'ye varan oranlarda daha yüksek olduğu saptanmıştır.
- (i) Soğurucuya kanatçık eklenmesiyle hacimsel debinin 80 lt/sa ve nanopartikül hacimsel oranının %4 olması şartıyla Ag-MgO/EG-H₂O hibrit nanoakışkanının kullanılması POTGÜK üzerinde en iyi performansı sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Khatib, T., Mohamed, A., and Sopian, K., "A review of solar energy modeling techniques", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 16 (5): 2864–2869 (2012).
2. Kannan, N. and Vakeesan, D., "Solar energy for future world: - A review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 62: 1092–1105 (2016).
3. Sarsam, W. S., Kazi, S. N., and Badarudin, A., "A review of studies on using nanofluids in flat-plate solar collectors", *Solar Energy*, 122: 1245–1265 (2015).
4. "A Comprehensive Review on Nanofluid Operated Solar Flat Plate Collectors | SpringerLink", <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-019-08514-z> (2021).
5. Raj, P. and Subudhi, S., "A review of studies using nanofluids in flat-plate and direct absorption solar collectors", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 84: 54–74 (2018).
6. Shamsul Azha, N. I., Hussin, H., Nasif, M. S., and Hussain, T., "Thermal Performance Enhancement in Flat Plate Solar Collector Solar Water Heater: A Review", *Processes*, 8 (7): 756 (2020).
7. Kumar, A., Said, Z., and Bellos, E., "An up-to-date review on evacuated tube solar collectors", *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, (2020).
8. Sabiha, M. A., Saidur, R., Mekhilef, S., and Mahian, O., "Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 51: 1038–1054 (2015).
9. Singh, A. K. and Samsher, "A review study of solar desalting units with evacuated tube collectors", *Journal Of Cleaner Production*, 279: 123542 (2021).
10. Mahbubul, I. M., Khan, M. M. A., Ibrahim, N. I., Ali, H. M., Al-Sulaiman, F. A., and Saidur, R., "Carbon nanotube nanofluid in enhancing the efficiency of evacuated tube solar collector", *Renewable Energy*, 121: 36–44 (2018).
11. Du, B., Lund, P. D., and Wang, J., "Combining CFD and artificial neural network techniques to predict the thermal performance of all-glass straight evacuated tube solar collector", *Energy*, 220: 119713 (2021).
12. "Https://Www.Solarankara.Com/", <https://www.solarankara.com/> .

13. Yılmaz, İ. H. and Mwesigye, A., "Modeling, simulation and performance analysis of parabolic trough solar collectors: A comprehensive review", *Applied Energy*, 225: 135–174 (2018).
14. Mawire, A. and Taole, S. H., "Experimental energy and exergy performance of a solar receiver for a domestic parabolic dish concentrator for teaching purposes", *Energy For Sustainable Development*, 19: 162–169 (2014).
15. Philibert, C., "The Present and Future Use of Solar Thermal Energy as a Primary Source of Energy", 16 .
16. "European Union", https://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fre.jrc.ec.europa.eu%2Fpvgis%2Fcmapi%2Fcmsaf_opt%2FPVGIS-EuropeSolarPotential.pdf&date=2015-12-30, .
17. "Güneş Enerjisi Kullanım Potansiyeli", <https://ekolojist.net/turkiyede-gunes-enerjisi-kullanimi-potansiyel-degeri/> .
18. Duffie, J. A. and William, A. B., "Solar Engineering of Thermal Processes", 3rd. Ed., *John Wiley & Sons*, New Jersey, (2006).
19. Tiwari, G. N., "Solar Energy: Fundamentals, Design, Modelling and Applications", *Alpha Science International*, New Delhi, (2006).
20. Foster, R., Ghassemi, M., and Cota, A., "Solar Energy: Renewable Energy and the Environment", 2nd. Ed., *CRC Press*, Boca Raton, (2010).
21. Goswami, D. Y., Kreith, F., and Kreider, J. F., "Principles of Solar Engineering", 2nd. Ed., *Taylor & Francis*, Philadelphia, (1999).
22. Yahyaoui, I., "Chapter 2 - Modeling of the Photovoltaic Irrigation Plant Components", Specifications of Photovoltaic Pumping Systems in Agriculture, *Elsevier*, 15–57 (2017).
23. Sukhatme, S. P. and Nayak, J. K., "Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage", 3rd. Ed., *McGraw-Hill*, New Delhi, (2008).
24. Dubey, S. and Tiwari, G. N., "Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications", *The Royal Society Of Chemistry*, Cambridge, (2010).
25. Herrería-Alonso, S., Suárez-González, A., Rodríguez-Pérez, M., Rodríguez-Rubio, R. F., and López-García, C., "A Solar Altitude Angle Model for Efficient Solar Energy Predictions", *Sensors*, 20 (5): 1391 (2020).
26. Soulayman, S., "Comments on solar azimuth angle", *Renewable Energy*, 123: 294–300 (2018).
27. Kalogirou, S. A., "Solar thermal collectors and applications", *Progress In Energy And Combustion Science*, 30 (3): 231–295 (2004).

28. Price, H., Lüpfert, E., Kearney, D., Zarza, E., Cohen, G., Gee, R., and Mahoney, R., "Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology", *Journal Of Solar Energy Engineering*, 124 (2): 109–125 (2002).
29. Fernández-García, A., Rojas, E., Pérez, M., Silva, R., Hernández-Escobedo, Q., and Manzano-Agugliaro, F., "A parabolic-trough collector for cleaner industrial process heat", *Journal Of Cleaner Production*, 89: 272–285 (2015).
30. Xu, H., Li, Y., Sun, J., and Li, L., "Transient model and characteristics of parabolic-trough solar collectors: Molten salt vs. synthetic oil", *Solar Energy*, 182: 182–193 (2019).
31. Aguilar, R., Valenzuela, L., Avila-Marin, A. L., and Garcia-Ybarra, P. L., "Simplified heat transfer model for parabolic trough solar collectors using supercritical CO₂", *Energy Conversion And Management*, 196: 807–820 (2019).
32. Kearney, D., Herrmann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., Cable, R., Potrovitza, N., Blake, D., and Price, H., "Assessment of a Molten Salt Heat Transfer Fluid in a Parabolic Trough Solar Field", *Journal Of Solar Energy Engineering*, 125 (2): 170–176 (2003).
33. Selvakumar, P., Somasundaram, P., and Thangavel, P., "Performance study on evacuated tube solar collector using therminol D-12 as heat transfer fluid coupled with parabolic trough", *Energy Conversion And Management*, 85: 505–510 (2014).
34. Ekiciler, R. and Arslan, K., "CuO/water nanofluid flow over microscale backward-facing step and analysis of heat transfer performance", *Heat Transfer Research*, 49 (15): (2018).
35. Nageswara Rao, V. and Ravi Sankar, B., "Heat transfer and friction factor investigations of CuO nanofluid flow in a double pipe U-bend heat exchanger", *Materials Today: Proceedings*, 18: 207–218 (2019).
36. Ahuja, A. S., "Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspensions. II. Analysis of the data", *Journal Of Applied Physics*, 46 (8): 3417–3425 (1975).
37. Lok, K. P. and Ober, C. K., "Particle size control in dispersion polymerization of polystyrene", *Canadian Journal Of Chemistry*, (2011).
38. Sohn, C. W. and Chen, M. M., "Microconvective Thermal Conductivity in Disperse Two-Phase Mixtures as Observed in a Low Velocity Couette Flow Experiment", *Journal Of Heat Transfer*, 103 (1): 47–51 (1981).
39. Choi, S. U. S. and Eastman, J. A., "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", *Argonne National Lab., IL (United States)*, (1995).
40. He, W., Toghraie, D., Lotfipour, A., Pourfattah, F., Karimipour, A., and Afrand, M., "Effect of twisted-tape inserts and nanofluid on flow field and heat transfer

- characteristics in a tube", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 110: 104440 (2020).
41. Mahian, O., Kolsi, L., Amani, M., Estellé, P., Ahmadi, G., Kleinstreuer, C., Marshall, J. S., Siavashi, M., Taylor, R. A., Niazmand, H., Wongwises, S., Hayat, T., Kolanjiyil, A., Kasaeian, A., and Pop, I., "Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamentals and theory", *Physics Reports*, 790: 1–48 (2019).
 42. Sheikholeslami, M., Jafaryar, M., Saleem, S., Li, Z., Shafee, A., and Jiang, Y., "Nanofluid heat transfer augmentation and exergy loss inside a pipe equipped with innovative turbulators", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 126: 156–163 (2018).
 43. Huminic, G. and Huminic, A., "Entropy generation of nanofluid and hybrid nanofluid flow in thermal systems: A review", *Journal Of Molecular Liquids*, 302: 112533 (2020).
 44. Li, Y., Zhou, J., Tung, S., Schneider, E., and Xi, S., "A review on development of nanofluid preparation and characterization", *Powder Technology*, 196 (2): 89–101 (2009).
 45. Philip, J., Shima, P. D., and Raj, B., "Nanofluid with tunable thermal properties", *Applied Physics Letters*, 92 (4): 043108 (2008).
 46. Li, Q. and Xuan, Y., "Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid", *Science In China Series E: Technolical Science*, 45 (4): 408–416 (2002).
 47. Chougule, S. S. and Sahu, S. K., "Thermal Performance of Automobile Radiator Using Carbon Nanotube-Water Nanofluid—Experimental Study", *Journal Of Thermal Science And Engineering Applications*, 6 (041009): (2014).
 48. Patel, H. E., Sundararajan, T., and Das, S. K., "An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids", *Journal Of Nanoparticle Research*, 12 (3): 1015–1031 (2010).
 49. Akash, A. R., Abraham, S., Pattamatta, A., and Das, S. K., "Experimental Assessment of the Thermo-Hydraulic Performance of Automobile Radiator with Metallic and Nonmetallic Nanofluids", *Heat Transfer Engineering*, 41 (3): 235–251 (2020).
 50. Sandeep, N., Sharma, R. P., and Ferdows, M., "Enhanced heat transfer in unsteady magnetohydrodynamic nanofluid flow embedded with aluminum alloy nanoparticles", *Journal Of Molecular Liquids*, 234: 437–443 (2017).
 51. Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., and Soleimani, S., "Two phase simulation of nanofluid flow and heat transfer using heatline analysis", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 47: 73–81 (2013).

52. Senthilraja, S., Karthikeyan, M., and Gangadevi, R., "Nanofluid applications in future automobiles: comprehensive review of existing data", *Nano-Micro Letters*, 2(4): 306-310 (2010).
53. Abu-Nada, E. and Chamkha, A. J., "Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures filled with a CuO–EG–Water nanofluid", *International Journal Of Thermal Sciences*, 49 (12): 2339–2352 (2010).
54. Nasiri, A., Shariaty-Niasar, M., Rashidi, A., Amrollahi, A., and Khodafarin, R., "Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid", *Experimental Thermal And Fluid Science*, 35 (4): 717–723 (2011).
55. Rashidi, S., Eskandarian, M., Mahian, O., and Poncet, S., "Combination of nanofluid and inserts for heat transfer enhancement", *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, 135 (1): 437–460 (2019).
56. Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Ai, F., and Wu, Q., "Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles", *Journal Of Applied Physics*, 91 (7): 4568–4572 (2002).
57. Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H., Hoseini, S. M., and Seifi Jamnani, M., "Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 38 (9): 1283–1290 (2011).
58. Zamzamian, A., Oskouie, S. N., Doosthoseini, A., Joneidi, A., and Pazouki, M., "Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al₂O₃/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow", *Experimental Thermal And Fluid Science*, 35 (3): 495–502 (2011).
59. Namburu, P. K., Das, D. K., Tanguturi, K. M., and Vajjha, R. S., "Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties", *International Journal Of Thermal Sciences*, 48 (2): 290–302 (2009).
60. Abu-Nada, E., "Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flows encountered in a backward facing step", *International Journal Of Heat And Fluid Flow*, 29 (1): 242–249 (2008).
61. Kasaeian, A., Daviran, S., Azarian, R. D., and Rashidi, A., "Performance evaluation and nanofluid using capability study of a solar parabolic trough collector", *Energy Conversion And Management*, 89: 368–375 (2015).
62. Sokhansefat, T., Kasaeian, A. B., and Kowsary, F., "Heat transfer enhancement in parabolic trough collector tube using Al₂O₃/synthetic oil nanofluid", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 33: 636–644 (2014).
63. Kaloudis, E., Papanicolaou, E., and Belessiotis, V., "Numerical simulations of a parabolic trough solar collector with nanofluid using a two-phase model", *Renewable Energy*, 97: 218–229 (2016).

64. Potenza, M., Milanese, M., Colangelo, G., and de Risi, A., "Experimental investigation of transparent parabolic trough collector based on gas-phase nanofluid", *Applied Energy*, 203: 560–570 (2017).
65. Bellos, E. and Tzivanidis, C., "Thermal efficiency enhancement of nanofluid-based parabolic trough collectors", *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, 135 (1): 597–608 (2019).
66. Khakrah, H., Shamloo, A., and Kazemzadeh Hannani, S., "Determination of Parabolic Trough Solar Collector Efficiency Using Nanofluid: A Comprehensive Numerical Study", *Journal Of Solar Energy Engineering*, 139 (051006): (2017).
67. de Risi, A., Milanese, M., and Laforgia, D., "Modelling and optimization of transparent parabolic trough collector based on gas-phase nanofluids", *Renewable Energy*, 58: 134–139 (2013).
68. Bellos, E., Tzivanidis, C., and Tsimpoukis, D., "Thermal, hydraulic and exergetic evaluation of a parabolic trough collector operating with thermal oil and molten salt based nanofluids", *Energy Conversion And Management*, 156: 388–402 (2018).
69. Mwesigye, A., Huan, Z., and Meyer, J. P., "Thermal performance and entropy generation analysis of a high concentration ratio parabolic trough solar collector with Cu-Therminol®VP-1 nanofluid", *Energy Conversion And Management*, 120: 449–465 (2016).
70. Sarkar, J., Ghosh, P., and Adil, A., "A review on hybrid nanofluids: Recent research, development and applications", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 43: 164–177 (2015).
71. Sidik, N. A. C., Adamu, I. M., Jamil, M. M., Kefayati, G. H. R., Mamat, R., and Najafi, G., "Recent progress on hybrid nanofluids in heat transfer applications: A comprehensive review", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 78: 68–79 (2016).
72. Suresh, S., Venkitaraj, K. P., Selvakumar, P., and Chandrasekar, M., "Synthesis of Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties", *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 388 (1): 41–48 (2011).
73. Balla, H. H., Abdullah, S., MohdFaizal, W., Zulkifli, R., and Sopian, K., "Numerical Study of the Enhancement of Heat Transfer for Hybrid CuO-Cu Nanofluids Flowing in a Circular Pipe", *Journal Of Oleo Science*, 62 (7): 533–539 (2013).
74. Takabi, B. and Shokouhmand, H., "Effects of Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluid on heat transfer and flow characteristics in turbulent regime", *International Journal Of Modern Physics C*, 26 (04): 1550047 (2014).

75. Bellos, E. and Tzivanidis, C., "Thermal analysis of parabolic trough collector operating with mono and hybrid nanofluids", *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, 26: 105–115 (2018).
76. Minea, A. A. and El-Maghlany, W. M., "Influence of hybrid nanofluids on the performance of parabolic trough collectors in solar thermal systems: Recent findings and numerical comparison", *Renewable Energy*, 120: 350–364 (2018).
77. Al-Oran, O., Lezsovits, F., and Aljawabrah, A., "Exergy and energy amelioration for parabolic trough collector using mono and hybrid nanofluids", *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, 140 (3): 1579–1596 (2020).
78. Ekiciler, R., Arslan, K., Turgut, O., and Kurşun, B., "Effect of hybrid nanofluid on heat transfer performance of parabolic trough solar collector receiver", *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, 143 (2): 1637–1654 (2021).
79. Cheng, Z.-D., He, Y.-L., and Qiu, Y., "A detailed nonuniform thermal model of a parabolic trough solar receiver with two halves and two inactive ends", *Renewable Energy*, 74: 139–147 (2015).
80. Ravi Kumar, K. and Reddy, K. S., "Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver", *Applied Energy*, 86 (9): 1804–1812 (2009).
81. Cheng, Z. D., He, Y. L., and Cui, F. Q., "Numerical study of heat transfer enhancement by unilateral longitudinal vortex generators inside parabolic trough solar receivers", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 55 (21): 5631–5641 (2012).
82. Amina, B., Miloud, A., Samir, L., Abdelylah, B., and Solano, J. P., "Heat transfer enhancement in a parabolic trough solar receiver using longitudinal fins and nanofluids", *Journal Of Thermal Science*, 25 (5): 410–417 (2016).
83. Chang, C., Sciacovelli, A., Wu, Z., Li, X., Li, Y., Zhao, M., Deng, J., Wang, Z., and Ding, Y., "Enhanced heat transfer in a parabolic trough solar receiver by inserting rods and using molten salt as heat transfer fluid", *Applied Energy*, 220: 337–350 (2018).
84. Okonkwo, E. C., Abid, M., and Ratlamwala, T. A. H., "Numerical Analysis of Heat Transfer Enhancement in a Parabolic Trough Collector Based on Geometry Modifications and Working Fluid Usage", *Journal Of Solar Energy Engineering*, 140 (051009): (2018).
85. Arshad Ahmed, K. and Natarajan, E., "Thermal performance enhancement in a parabolic trough receiver tube with internal toroidal rings: A numerical investigation", *Applied Thermal Engineering*, 162: 114224 (2019).
86. Kurşun, B., "Thermal performance assessment of internal longitudinal fins with sinusoidal lateral surfaces in parabolic trough receiver tubes", *Renewable Energy*, 140: 816–827 (2019).

87. Günther, M., Joemann, M., and Csambor, S., "Advanced CSP Teaching Materials Chapter 5 Parabolic Trough Technology", Advanced CSP Teaching Materials, *Enermena*, Germany, (2011).
88. Bellos, E. and Tzivanidis, C., "Alternative designs of parabolic trough solar collectors", *Progress In Energy And Combustion Science*, 71: 81–117 (2019).
89. Kalogirou, S. A., "Solar Energy Engineering: Processes and Systems", *Academic Press*, 841 (2013).
90. Bellos, E. and Tzivanidis, C., "Analytical Expression of Parabolic Trough Solar Collector Performance", *Designs*, 2 (1): 9 (2018).
91. Coccia, G., Latini, G., and Sotte, M., "Mathematical modeling of a prototype of parabolic trough solar collector", *Journal Of Renewable And Sustainable Energy*, 4 (2): 023110 (2012).
92. Kulahli, M. C., Akbulut Özen, S., and Etemoglu, A. B., "Numerical simulation of a parabolic trough collector containing a novel parabolic reflector with varying focal length", *Applied Thermal Engineering*, 161: 114210 (2019).
93. Hachicha, A. A., Rodríguez, I., Capdevila, R., and Oliva, A., "Heat transfer analysis and numerical simulation of a parabolic trough solar collector", *Applied Energy*, 111: 581–592 (2013).
94. Hoseinzadeh, H., Kasaeian, A., and Behshad Shafii, M., "Geometric optimization of parabolic trough solar collector based on the local concentration ratio using the Monte Carlo method", *Energy Conversion And Management*, 175: 278–287 (2018).
95. Dudley, V. E., Kolb, G. J., Mahoney, A. R., Mancini, T. R., Matthews, C. W., Sloan, M., and Kearney, D., "Test results: SEGS LS-2 solar collector", *Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States)*, (1994).
96. Ranjan, A. and Prakash, E. V., "Performance Optimization of Solar PTC System using two Different Receiver Tube Materials", *International Journal Of Engineering Research*, 8 (11): 6 .
97. Incropera, F., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., and Lavine, A. S., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 6th. Ed., *John Wiley And Sons*, New York, (2007).
98. Pak, B. C. and Cho, Y. I., "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles", *Experimental Heat Transfer*, 11 (2): 151–170 (1998).
99. Xuan, Y. and Roetzel, W., "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 43 (19): 3701–3707 (2000).
100. Mishra, P. C., Mukherjee, S., Nayak, S. K., and Panda, A., "A brief review on viscosity of nanofluids", *International Nano Letters*, 4 (4): 109–120 (2014).

101. Hamilton, R. L. and Crosser, O. K., "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems", *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1 (3): 187–191 (1962).
102. Verma, S. K. and Tiwari, A. K., "Progress of nanofluid application in solar collectors: A review", *Energy Conversion And Management*, 100: 324–346 (2015).
103. H, M., A, E., and K, T., "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of γ -Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles)", *Netsu Bussei (Japan)*, 4 (4): 227–233 (1993).
104. Li, C. H. and Peterson, G. P., "Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids)", *Journal Of Applied Physics*, 99 (8): 084314 (2006).
105. Albadr, J., Tayal, S., and Alasadi, M., "Heat transfer through heat exchanger using Al₂O₃ nanofluid at different concentrations", *Case Studies In Thermal Engineering*, 1 (1): 38–44 (2013).
106. Chakraborty, S. and Panigrahi, P. K., "Stability of nanofluid: A review", *Applied Thermal Engineering*, 174: 115259 (2020).
107. Xia, G., Jiang, H., Liu, R., and Zhai, Y., "Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al₂O₃/de-ionized water nanofluids", *International Journal Of Thermal Sciences*, 84: 118–124 (2014).
108. Li, X. F., Zhu, D. S., Wang, X. J., Wang, N., Gao, J. W., and Li, H., "Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H₂O nanofluids", *Thermochimica Acta*, 469 (1): 98–103 (2008).
109. Tanvir, S. and Qiao, L., "Surface tension of Nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials", *Nanoscale Research Letters*, 7 (1): 226 (2012).
110. Mingzheng, Z., Guodong, X., Jian, L., Lei, C., and Lijun, Z., "Analysis of factors influencing thermal conductivity and viscosity in different kinds of surfactant solutions", *Experimental Thermal And Fluid Science*, 36: 22–29 (2012).
111. Bakthavatchalam, B., Habib, K., Wilfred, C. D., Saidur, R., and Saha, B. B., "Comparative evaluation on the thermal properties and stability of MWCNT nanofluid with conventional surfactants and ionic liquid", *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, (2020).
112. Salehi, J. M., Heyhat, M. M., and Rajabpour, A., "Enhancement of thermal conductivity of silver nanofluid synthesized by a one-step method with the effect of polyvinylpyrrolidone on thermal behavior", *Applied Physics Letters*, 102 (23): 231907 (2013).
113. Kwan, C.-C., Chiu, W.-H., Chang, N.-F., Wu, P.-S., and Huang, K.-F., "Effect of taurate surfactant and polyvinylpyrrolidone on kaolinite suspension", *Colloids*

- And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 377 (1): 175–181 (2011).
114. Tian, H., Liang, Y., Yang, D., and Sun, Y., "Characteristics of PVP-stabilised NZVI and application to dechlorination of soil-sorbed TCE with ionic surfactant", *Chemosphere*, 239: 124807 (2020).
 115. Achaby, M. E., Arrakhiz, F.-E., Vaudreuil, S., Essassi, E. M., Qaiss, A., and Bousmina, M., "Nanocomposite films of poly(vinylidene fluoride) filled with polyvinylpyrrolidone-coated multiwalled carbon nanotubes: Enhancement of β -polymorph formation and tensile properties", *Polymer Engineering & Science*, 53 (1): 34–43 (2013).
 116. Fadhillahanafi, N. M., Leong, K. Y., and Risby, M. S., "Stability and Thermal Conductivity Characteristics of Carbon Nanotube based Nanofluids", *International Journal Of Automotive And Mechanical Engineering*, 8: 1376–1384 (2013).
 117. Topkaya, R., Kurtan, U., Baykal, A., and Toprak, M. S., "Polyvinylpyrrolidone (PVP)/MnFe₂O₄ nanocomposite: Sol-Gel autocombustion synthesis and its magnetic characterization", *Ceramics International*, 39 (5): 5651–5658 (2013).
 118. Liu, H.-L., Ko, S. P., Wu, J.-H., Jung, M.-H., Min, J. H., Lee, J. H., An, B. H., and Kim, Y. K., "One-pot polyol synthesis of monosize PVP-coated sub-5nm Fe₃O₄ nanoparticles for biomedical applications", *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, 310 (2, Part 3): e815–e817 (2007).
 119. Nohavica, D. and Gladkov, P., "ZnO nanoparticles and their applications – new achievements", *Olomouc, Czech Republic*, 10: 12–14 (2010).
 120. DeWinter, F., "Solar Collectors, Energy Storage, and Materials", *MIT Press*, 1116 (1990).
 121. Holman, J. P., "Experimental Methods for Engineers", 8th. Ed., *Mc-Graw Hill*, (2011).
 122. Bejan, A., "Convection Heat Transfer", 4th. Ed., *John Wiley & Sons*, Hoboken, New Jersey, 168–169 (2013).
 123. Wendelin, T., "SolTRACE: a new optical modeling tool for concentrating solar optics", *International Solar Energy Conference*, (2003).
 124. Mwesigye, A. and Meyer, J. P., "Optimal thermal and thermodynamic performance of a solar parabolic trough receiver with different nanofluids and at different concentration ratios", *Applied Energy*, 193: 393–413 (2017).
 125. Tayebi, T. and Chamkha, A. J., "Free convection enhancement in an annulus between horizontal confocal elliptical cylinders using hybrid nanofluids", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 70 (10): 1141–1156 (2016).

126. Maxwell, J. C., "A Treatise on Electricity and Magnetism", *Clarendon Press*, Oxford, UK, (1881).
127. Minea, A. A., "Challenges in hybrid nanofluids behavior in turbulent flow: Recent research and numerical comparison", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 71: 426–434 (2017).
128. Korres, D., Bellos, E., and Tzivanidis, C., "Investigation of a nanofluid-based compound parabolic trough solar collector under laminar flow conditions", *Applied Thermal Engineering*, 149: 366–376 (2019).
129. Mwesigye, A., Bello-Ochende, T., and Meyer, J. P., "Numerical investigation of entropy generation in a parabolic trough receiver at different concentration ratios", *Energy*, 53: 114–127 (2013).
130. Mahmud, S. and Fraser, R. A., "Magnetohydrodynamic free convection and entropy generation in a square porous cavity", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 47 (14): 3245–3256 (2004).
131. Kalogirou, S. A., Neocleous, C. C., and Schizas, C. N., "A comparative study of methods for estimating intercept factor of parabolic trough collectors", *In: Proceedings of the International Conference EANN'96*, London (UK), 1996. p. 5–8
132. Rezaeian, M., Shafiey Dehaj, M., Zamani Mohiabadi, M., Salarmofrad, M., and Shamsi, S., "Experimental investigation into a parabolic solar collector with direct flow evacuated tube", *Applied Thermal Engineering*, 189: 116608 (2021).
133. Subramani, J., Nagarajan, P. K., Wongwises, S., El-Agouz, S. A., and Sathyamurthy, R., "Experimental study on the thermal performance and heat transfer characteristics of solar parabolic trough collector using Al₂O₃ nanofluids", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37 (3): 1149–1159 (2018).
134. Deng, Y., Zhao, Y., Wang, W., Quan, Z., Wang, L., and Yu, D., "Experimental investigation of performance for the novel flat plate solar collector with micro-channel heat pipe array (MHPA-FPC)", *Applied Thermal Engineering*, 54 (2): 440–449 (2013).
135. Akram, N., Sadri, R., Kazi, S. N., Ahmed, S. M., Zubir, M. N. M., Ridha, M., Soudagar, M., Ahmed, W., Arzpeyma, M., and Tong, G. B., "An experimental investigation on the performance of a flat-plate solar collector using eco-friendly treated graphene nanoplatelets–water nanofluids", *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, 138 (1): 609–621 (2019).
136. Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh, E., and Zinadini, S., "An experimental investigation on the effect of Al₂O₃–H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors", *Renewable Energy*, 39 (1): 293–298 (2012).
137. Sharafeldin, M. A. and Gróf, G., "Efficiency of evacuated tube solar collector using WO₃/Water nanofluid", *Renewable Energy*, 134: 453–460 (2019).

138. Saffarian, M. R., Moravej, M., and Doranehgard, M. H., "Heat transfer enhancement in a flat plate solar collector with different flow path shapes using nanofluid", *Renewable Energy*, 146: 2316–2329 (2020).
139. Iranmanesh, S., Ong, H. C., Ang, B. C., Sadeghinezhad, E., Esmailzadeh, A., and Mehrali, M., "Thermal performance enhancement of an evacuated tube solar collector using graphene nanoplatelets nanofluid", *Journal Of Cleaner Production*, 162: 121–129 (2017).
140. Bellos, E., Tzivanidis, C., and Said, Z., "A systematic parametric thermal analysis of nanofluid-based parabolic trough solar collectors", *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, 39: 100714 (2020).
141. Tijani, A. S. and Roslan, A. M. S. B., "Simulation Analysis of Thermal Losses of Parabolic trough Solar Collector in Malaysia Using Computational Fluid Dynamics", *Procedia Technology*, 15: 841–848 (2014).
142. Sheikholeslami, M. and Bhatti, M. M., "Active method for nanofluid heat transfer enhancement by means of EHD", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 109: 115–122 (2017).
143. Wang, X.-Q. and Mujumdar, A. S., "Heat transfer characteristics of nanofluids: a review", *International Journal Of Thermal Sciences*, 46 (1): 1–19 (2007).
144. Pandey, S. D. and Nema, V. K., "Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger", *Experimental Thermal And Fluid Science*, 38: 248–256 (2012).
145. Ravi Kumar, N. T., Bhramara, P., Addis, B. M., Sundar, L. S., Singh, M. K., and Sousa, A. C. M., "Heat transfer, friction factor and effectiveness analysis of Fe₃O₄/water nanofluid flow in a double pipe heat exchanger with return bend", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 81: 155–163 (2017).
146. Ravi Kumar, N. T., Bhramara, P., Kirubeil, A., Syam Sundar, L., Singh, M. K., and Sousa, A. C. M., "Effect of twisted tape inserts on heat transfer, friction factor of Fe₃O₄ nanofluids flow in a double pipe U-bend heat exchanger", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 95: 53–62 (2018).
147. Ekiciler, R. and Samet Ali Çetinkaya, M., "A comparative heat transfer study between monotype and hybrid nanofluid in a duct with various shapes of ribs", *Thermal Science And Engineering Progress*, 23: 100913 (2021).
148. Mahian, O., Mahmud, S., and Pop, I., "Analysis of first and second laws of thermodynamics between two isothermal cylinders with relative rotation in the presence of MHD flow", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 55 (17): 4808–4816 (2012).
149. Mahian, O., Kianifar, A., Kleinstreuer, C., Al-Nimr, M. A., Pop, I., Sahin, A. Z., and Wongwises, S., "A review of entropy generation in nanofluid flow", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 65: 514–532 (2013).

150. Sohel, M. R., Saidur, R., Hassan, N. H., Elias, M. M., Khaleduzzaman, S. S., and Mahbubul, I. M., "Analysis of entropy generation using nanofluid flow through the circular microchannel and minichannel heat sink", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 46: 85–91 (2013).
151. Manay, E., Akyürek, E. F., and Sahin, B., "Entropy generation of nanofluid flow in a microchannel heat sink", *Results In Physics*, 9: 615–624 (2018).
152. Saleh, B. and Sundar, L. S., "Experimental study on heat transfer, friction factor, entropy and exergy efficiency analyses of a corrugated plate heat exchanger using Ni/water nanofluids", *International Journal Of Thermal Sciences*, 165: 106935 (2021).

EK AÇIKLAMALAR A.

BELİRSİZLİK ANALİZİ ÖRNEK HESAPLAMA

Örnek hesaplamada maksimum hata oranını belirlemek için deneysel çalışmada elde edilen en büyük veriler kullanılmıştır. Bu veriler aşağıdaki gibidir.

$$\dot{V}=80 \text{ lt/sa}$$

$$\Delta T=11,5 \text{ K}$$

$$\dot{G}_T=912,2 \text{ W/m}^2$$

Deneyselerde kullanılan ölçüm cihazlarının hassasiyetleri aşağıdaki gibidir.

$$\text{Sıcaklık ölçümleri} \quad : \pm 0,1 \text{ K}$$

$$\text{Güneş ışınımı ölçümleri} \quad : \pm 10 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Hacimsel debi ölçümleri} \quad : \pm \%4$$

Kolektör verimi ($\eta_{\text{Isıl}} = \frac{\rho \dot{V} c_p \Delta T}{A_c \dot{G}_T}$) için belirsizlik analizi yapılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{\partial \eta_{\text{Isıl}}}{\eta_{\text{Isıl}}} = \left[\left(\frac{\partial \rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{V}}{\dot{V}} \right)^2 + \left(\frac{\partial c_p}{c_p} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_c}{A_c} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{G}_T}{\dot{G}_T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial \eta_{\text{Isıl}}}{\eta_{\text{Isıl}}} = \left[(0)^2 + \left(\frac{0,04}{80} \right)^2 + (0)^2 + \left(\frac{0,1}{11,5} \right)^2 + (0)^2 + \left(\frac{10}{912,2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{\partial \eta_{\text{Isıl}}}{\eta_{\text{Isıl}}} = 0,014 = \%1,4$$

EK AÇIKLAMALAR B.

DENEY SONUÇLARI

%1,0 ZnO/EG-H₂O (20 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	439,1	32	32,9	0,6	23,1	0,0732
10.30	489,6	32	33,4	0,8	24,6	0,1021
11.00	613,4	32	34,1	0,6	25,6	0,1223
11.30	658,2	32	34,6	0,4	26,3	0,1411
12.00	809,0	32	35,9	0,4	26,6	0,1722
12.30	803,3	32	37,2	0,5	27,5	0,2312
13.00	835,8	32	38,3	0,3	28,9	0,2692
13.30	851,3	32	39,3	0,7	29,3	0,3062
14.00	860,3	32	40,9	0,5	29,4	0,3695
14.30	838,3	32	42,0	0,3	30,3	0,4260
15.00	769,0	32	42,1	0,4	29,7	0,4690
15.30	735,6	32	41,4	0,6	29,4	0,4564
16.00	641,1	32	39,5	1,3	28,7	0,4178
16.30	534,4	32	37,2	1,5	27,6	0,3475
17.00	482,3	32	35,5	0,6	26,8	0,2592
%1,0 ZnO/EG-H₂O (20 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	413,8	30	30,9	0,3	22,9	0,0777
10.30	470,1	30	31,5	0,2	24,4	0,1140
11.00	658,2	30	32,2	0,7	24,8	0,1194
11.30	722,6	30	32,8	1,0	25,3	0,1384
12.00	761,7	30	33,7	1,2	25,9	0,1735
12.30	812,2	30	35,3	1,3	27,5	0,2330
13.00	872,5	30	36,5	1,2	27,9	0,2661
13.30	867,6	30	37,5	1,1	28,2	0,3087
14.00	837,5	30	38,7	1,0	28,6	0,3710
14.30	794,3	30	39,5	0,5	27,9	0,4271
15.00	756,0	30	40,2	0,8	28,4	0,4818
15.30	725,1	30	39,5	1,0	28,2	0,4679
16.00	681,9	30	38,2	1,1	27,6	0,4294
16.30	559,7	30	35,3	0,7	26,2	0,3382
17.00	505,9	30	33,6	0,9	25,6	0,2541

%1,0 ZnO/EG-H₂O (40 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	455,4	28	28,5	0,2	22,9	0,0784
10.30	560,5	28	28,9	0,4	23,4	0,1147
11.00	638,7	28	29,4	0,4	24,4	0,1566
11.30	747,0	28	29,9	0,8	24,8	0,1817
12.00	782,1	28	30,2	0,7	25,3	0,2009
12.30	788,6	28	30,8	0,8	26,0	0,2536
13.00	869,2	28	31,3	0,8	26,2	0,2712
13.30	880,7	28	32,9	0,9	26,6	0,3974
14.00	851,3	28	33,3	0,7	26,8	0,4447
14.30	860,3	28	33,8	0,9	27,1	0,4815
15.00	825,3	28	33,9	1,0	26,5	0,5106
15.30	732,4	28	33,0	0,6	25,7	0,4876
16.00	677,8	28	32,3	0,7	25,4	0,4531
16.30	587,4	28	31,1	0,9	25,2	0,3769
17.00	523,8	28	30,1	0,4	24,6	0,2864
%1,0 ZnO/EG-H₂O (40 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	459,5	30	30,5	0,3	22,6	0,0777
10.30	481,5	30	30,8	0,6	24,2	0,1187
11.00	535,2	30	31,2	0,5	24,5	0,1601
11.30	622,4	30	31,6	0,9	25,4	0,1836
12.00	713,6	30	32,1	1,1	26,2	0,2102
12.30	765,8	30	32,7	0,9	27,7	0,2518
13.00	809,8	30	33,2	1,0	27,9	0,2822
13.30	848,1	30	34,6	1,0	28,3	0,3874
14.00	857,0	30	35,4	1,2	28,8	0,4500
14.30	859,5	30	35,8	1,3	28,2	0,4820
15.00	849,7	30	36,1	1,5	28,4	0,5128
15.30	712,8	30	34,7	1,3	28,1	0,4710
16.00	616,7	30	33,8	1,0	27,5	0,4401
16.30	518,1	30	32,8	1,5	26,3	0,3860
17.00	510,8	30	32,0	0,8	25,1	0,2797

%1,0 ZnO/EG-H ₂ O (60 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m ²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	487,2	31	31,4	0,1	21,7	0,0880
10.30	631,4	31	31,8	0,3	22,4	0,1357
11.00	699,8	31	32,2	0,7	23,5	0,1837
11.30	793,5	31	32,5	0,8	24,2	0,2025
12.00	872,5	31	32,9	0,8	24,6	0,2333
12.30	879,0	31	33,3	0,9	25,9	0,2803
13.00	904,3	31	33,5	1,2	27,3	0,2962
13.30	907,5	31	34,5	1,3	27,7	0,4132
14.00	857,0	31	34,7	1,3	29,5	0,4626
14.30	842,4	31	35,0	1,4	28,6	0,5087
15.00	835,0	31	35,2	1,5	28,9	0,5389
15.30	756,8	31	34,5	1,5	28,6	0,4955
16.00	714,5	31	34,2	1,2	28,0	0,4798
16.30	597,1	31	33,2	1,3	27,6	0,3947
17.00	540,9	31	32,6	1,0	26,4	0,3169
%1,0 ZnO/EG-H ₂ O (60 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m ²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	457,8	30	30,4	0,2	20,3	0,0936
10.30	522,2	30	30,6	0,3	22,1	0,1231
11.00	617,5	30	31,0	0,4	23,3	0,1735
11.30	721,0	30	31,3	0,4	24,6	0,1932
12.00	744,6	30	31,6	0,7	25,4	0,2302
12.30	817,9	30	32,2	0,6	26,2	0,2882
13.00	860,3	30	32,4	0,5	26,5	0,2989
13.30	857,8	30	33,3	0,7	27,5	0,4122
14.00	869,2	30	33,7	0,6	27,9	0,4561
14.30	880,7	30	34,2	0,6	28,5	0,5109
15.00	811,4	30	34,1	0,8	28,2	0,5414
15.30	690,8	30	33,1	0,9	28,1	0,4808
16.00	623,2	30	32,7	0,7	27,7	0,4642
16.30	507,5	30	31,9	0,9	25,4	0,4011
17.00	474,1	30	31,3	1,2	24,5	0,2938

%1,0 ZnO/EG-H₂O (80 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	408,3	27	27,3	0,2	21,6	0,1225
10.30	438,6	27	27,5	0,4	22,1	0,1628
11.00	444,1	27	27,7	0,4	23,1	0,2252
11.30	515,9	27	27,9	0,9	23,5	0,2492
12.00	595,9	27	28,1	1,0	24,0	0,2637
12.30	653,8	27	28,4	1,0	24,7	0,3059
13.00	700,7	27	28,6	1,3	24,9	0,3262
13.30	729,7	27	29,3	1,4	25,3	0,4503
14.00	787,6	27	29,7	1,4	25,5	0,4897
14.30	764,1	27	29,9	1,5	25,8	0,5422
15.00	702,1	27	29,8	1,4	25,2	0,5697
15.30	648,3	27	29,4	1,2	24,4	0,5288
16.00	546,2	27	28,9	0,8	24,1	0,4969
16.30	500,7	27	28,5	1,0	23,9	0,4279
17.00	442,8	27	28,0	0,7	23,3	0,3226
%1,0 ZnO/EG-H₂O (80 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	417,9	28	28,4	0,1	22,7	0,1367
10.30	426,2	28	28,5	0,4	23,6	0,1676
11.00	449,7	28	28,7	0,7	24,8	0,2224
11.30	528,3	28	28,9	0,6	24,9	0,2434
12.00	579,3	28	29,1	0,8	25,8	0,2712
12.30	673,1	28	29,5	0,9	26,2	0,3183
13.00	681,4	28	29,5	1,2	26,5	0,3145
13.30	710,3	28	30,2	0,9	26,7	0,4424
14.00	706,2	28	30,4	1,3	26,9	0,4855
14.30	684,1	28	30,6	1,0	27,0	0,5429
15.00	691,0	28	30,8	1,1	26,3	0,5788
15.30	637,2	28	30,3	0,6	25,2	0,5156
16.00	577,9	28	30,0	1,4	25,4	0,4944
16.30	525,5	28	29,6	1,6	25,1	0,4349
17.00	491,0	28	29,2	1,5	23,2	0,3491

%2,0 ZnO/EG-H₂O (20 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	435,9	27	28	0,6	20,3	0,0818
10.30	529,7	27	28,8	0,7	21,6	0,1212
11.00	573,8	27	29,2	0,6	23,5	0,1368
11.30	702,1	27	30,0	0,5	23,8	0,1524
12.00	762,8	27	30,9	0,7	24,4	0,1824
12.30	786,2	27	32,4	0,9	24,6	0,2450
13.00	806,9	27	33,2	0,6	24,9	0,2741
13.30	826,2	27	34,3	0,4	25,1	0,3152
14.00	851,0	27	36,3	0,7	25,4	0,3899
14.30	827,6	27	37,1	0,8	25,8	0,4354
15.00	757,2	27	37,6	0,8	24,6	0,4994
15.30	692,4	27	36,1	1,2	23,1	0,4689
16.00	626,2	27	34,7	1,3	22,3	0,4387
16.30	539,3	27	32,3	1,3	21,9	0,3506
17.00	521,4	27	30,9	1,2	21,4	0,2668
%2,0 ZnO/EG-H₂O (20 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	455,2	27	28,1	0,4	21,8	0,0862
10.30	500,7	27	28,7	0,4	21,3	0,1211
11.00	580,7	27	29,1	0,8	22,8	0,1290
11.30	692,4	27	30,0	0,5	23,4	0,1546
12.00	802,8	27	31,2	0,6	24,6	0,1866
12.30	842,8	27	32,9	1,0	24,8	0,2497
13.00	846,9	27	33,6	0,8	24,9	0,2780
13.30	852,4	27	34,6	0,5	25,3	0,3181
14.00	820,7	27	35,9	0,7	25,4	0,3869
14.30	819,3	27	37,0	0,8	25,9	0,4354
15.00	772,4	27	37,8	1,2	23,5	0,4988
15.30	699,3	27	36,2	1,3	23,0	0,4693
16.00	582,1	27	34,2	0,7	22,8	0,4413
16.30	533,8	27	32,2	0,6	21,5	0,3475
17.00	488,3	27	30,6	0,9	20,5	0,2630

%2,0 ZnO/EG-H₂O (40 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	440,4	28	28,6	0,3	21,5	0,0972
10.30	564,9	28	29,0	0,6	22,3	0,1263
11.00	622,2	28	29,5	0,7	23,2	0,1720
11.30	742,2	28	30,0	0,6	23,9	0,1923
12.00	796,1	28	30,5	0,9	24,6	0,2241
12.30	834,5	28	31,2	1,1	25,5	0,2736
13.00	850,3	28	31,5	0,9	25,6	0,2937
13.30	880,7	28	33,0	1,0	25,8	0,4051
14.00	871,9	28	33,6	1,2	25,9	0,4583
14.30	872,0	28	34,0	0,8	26,1	0,4909
15.00	812,8	28	34,1	0,8	25,6	0,5355
15.30	751,4	28	33,2	0,9	24,5	0,4938
16.00	696,7	28	32,5	1,1	24,2	0,4608
16.30	612,8	28	31,4	1,2	23,5	0,3959
17.00	497,5	28	30,1	0,9	21,7	0,3012
%2,0 ZnO/EG-H₂O (40 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	443,7	27	27,6	0,2	19,6	0,0965
10.30	589,5	27	28,1	0,3	20,1	0,1331
11.00	679,3	27	28,7	0,4	20,7	0,1786
11.30	808,4	27	29,3	0,5	21,5	0,2030
12.00	825,3	27	29,6	0,9	22,8	0,2248
12.30	872,5	27	30,5	0,9	23,4	0,2862
13.00	882,8	27	30,8	1,1	23,7	0,3071
13.30	875,1	27	31,9	1,3	24,1	0,3995
14.00	888,7	27	32,7	1,1	24,5	0,4576
14.30	862,0	27	33,1	0,9	24,7	0,5049
15.00	861,0	27	33,4	1,3	22,5	0,5303
15.30	766,0	27	32,2	0,8	21,6	0,4843
16.00	693,2	27	31,5	0,7	21,7	0,4632
16.30	571,3	27	30,2	1,2	21,2	0,3996
17.00	519,9	27	29,2	1,0	20,2	0,3019

%2,0 ZnO/EG-H₂O (60 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	504,3	27	27,5	0,9	19,2	0,1061
10.30	603,0	27	27,8	0,8	21,0	0,1420
11.00	685,0	27	28,2	0,9	21,3	0,1875
11.30	822,8	27	28,7	1,1	21,8	0,2211
12.00	864,5	27	28,9	1,4	22,9	0,2352
12.30	902,8	27	29,5	1,5	24,2	0,2964
13.00	897,3	27	29,7	1,6	23,7	0,3220
13.30	899,8	27	30,6	1,4	24,0	0,4282
14.00	912,2	27	31,0	1,1	24,9	0,4693
14.30	893,3	27	31,3	0,8	23,5	0,5152
15.00	851,1	27	31,4	1,0	22,3	0,5533
15.30	748,1	27	30,5	0,7	21,9	0,5007
16.00	687,8	27	30,1	0,9	20,7	0,4824
16.30	646,4	27	29,5	1,2	21,3	0,4139
17.00	549,0	27	28,7	1,4	21,1	0,3314
%2,0 ZnO/EG-H₂O (60 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	486,3	27	27,5	0,5	18,5	0,1100
10.30	544,7	27	27,7	0,8	19,3	0,1375
11.00	658,1	27	28,1	1,0	20,7	0,1789
11.30	756,9	27	28,7	0,9	21,3	0,2404
12.00	782,7	27	28,9	0,7	21,6	0,2598
12.30	836,7	27	29,4	1,0	22,0	0,3070
13.00	886,2	27	29,7	0,9	22,3	0,3261
13.30	863,9	27	30,5	1,0	22,7	0,4336
14.00	884,2	27	30,9	1,4	23,2	0,4720
14.30	909,0	27	31,4	1,1	23,1	0,5180
15.00	882,3	27	31,6	1,3	22,6	0,5580
15.30	785,0	27	30,6	1,5	21,2	0,4908
16.00	627,2	27	29,9	0,7	20,1	0,4948
16.30	539,9	27	29,1	0,9	19,7	0,4163
17.00	496,3	27	28,5	0,7	19,4	0,3235

%2,0 ZnO/EG-H₂O (80 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	471,8	27	27,5	0,5	19,0	0,1512
10.30	548,1	27	27,7	0,4	19,2	0,1822
11.00	600,8	27	28,0	0,3	20,0	0,2375
11.30	790,4	27	28,4	0,5	20,4	0,2528
12.00	835,4	27	28,6	0,4	21,6	0,2733
12.30	871,3	27	29,1	0,4	22,2	0,3439
13.00	877,2	27	29,2	0,3	22,3	0,3579
13.30	898,6	27	29,9	0,6	22,4	0,4605
14.00	901,1	27	30,1	0,5	23,0	0,4909
14.30	878,8	27	30,5	0,7	22,9	0,5683
15.00	859,8	27	30,6	0,6	22,4	0,5975
15.30	835,4	27	30,1	0,8	22,3	0,5295
16.00	784,0	27	29,8	0,7	21,2	0,5096
16.30	624,0	27	29,0	0,5	20,6	0,4574
17.00	556,8	27	28,4	0,2	19,7	0,3588
%2,0 ZnO/EG-H₂O (80 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	517,8	27	27,6	0,4	18,3	0,1653
10.30	622,1	27	27,8	0,7	19,4	0,1835
11.00	668,1	27	28,1	1,0	19,6	0,2349
11.30	797,1	27	28,4	0,9	21,5	0,2506
12.00	827,6	27	28,6	1,1	22,3	0,2759
12.30	886,0	27	29,1	1,2	22,3	0,3382
13.00	886,2	27	29,2	1,6	22,5	0,3542
13.30	900,9	27	29,9	1,1	23,2	0,4593
14.00	906,7	27	30,1	1,4	23,3	0,4879
14.30	877,7	27	30,5	1,3	23,2	0,5690
15.00	879,0	27	30,6	1,0	21,7	0,5844
15.30	847,7	27	30,1	1,4	21,3	0,5218
16.00	715,7	27	29,5	1,7	21,1	0,4984
16.30	594,8	27	28,9	1,6	19,6	0,4558
17.00	515,4	27	28,3	1,2	19,3	0,3599

%3,0 ZnO/EG-H₂O (20 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	447,1	28	29,2	0,3	18,9	0,0956
10.30	534,3	28	30,0	0,5	21,2	0,1333
11.00	584,1	28	30,4	0,3	21,6	0,1464
11.30	714,2	28	31,3	0,7	21,9	0,1646
12.00	737,7	28	32,0	0,5	22,1	0,1931
12.30	791,7	28	33,6	0,8	22,6	0,2519
13.00	851,2	28	34,8	0,7	23,1	0,2846
13.30	842,9	28	35,7	0,8	23,7	0,3254
14.00	829,1	28	37,3	0,9	23,8	0,3995
14.30	837,4	28	38,5	0,7	23,6	0,4466
15.00	805,5	28	39,5	0,8	23,6	0,5085
15.30	728,0	28	37,8	0,9	23,4	0,4795
16.00	622,8	28	36,0	1,0	22,7	0,4575
16.30	559,2	28	33,8	1,1	20,7	0,3694
17.00	474,7	28	31,8	1,2	20,3	0,2851
%3,0 ZnO/EG-H₂O (20 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	444,3	28	29,2	0,4	19,3	0,0962
10.30	490,0	28	29,9	0,7	20,5	0,1381
11.00	521,8	28	30,1	0,9	21,8	0,1433
11.30	676,8	28	31,2	1,1	21,9	0,1684
12.00	755,7	28	32,0	1,2	22,0	0,1885
12.30	786,2	28	33,6	1,3	22,9	0,2537
13.00	794,5	28	34,6	1,4	23,3	0,2959
13.30	812,5	28	35,5	1,2	23,7	0,3288
14.00	824,9	28	37,2	1,4	23,7	0,3973
14.30	786,2	28	38,0	1,4	23,3	0,4531
15.00	755,7	28	38,9	1,6	23,4	0,5138
15.30	739,1	28	37,8	1,5	23,2	0,4723
16.00	604,8	28	35,7	1,5	22,2	0,4535
16.30	557,8	28	33,7	1,6	21,6	0,3640
17.00	509,3	28	32,1	1,7	19,8	0,2867

%3,0 ZnO/EG-H₂O (40 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	451,2	28	28,7	0,3	18,7	0,1105
10.30	524,6	28	29,1	0,5	20,7	0,1494
11.00	615,9	28	29,6	0,2	20,9	0,1851
11.30	717,0	28	30,2	0,4	20,4	0,2186
12.00	736,3	28	30,4	0,4	21,5	0,2322
12.30	824,9	28	31,4	0,6	22,3	0,2936
13.00	831,8	28	31,7	0,4	22,3	0,3169
13.30	848,4	28	32,9	0,5	22,9	0,4114
14.00	849,8	28	33,6	0,8	23,4	0,4694
14.30	805,5	28	33,8	1,0	23,7	0,5129
15.00	769,6	28	34,0	0,5	23,3	0,5554
15.30	748,8	28	33,4	0,7	22,7	0,5137
16.00	703,1	28	32,7	0,4	21,3	0,4762
16.30	638,1	28	31,6	0,3	20,2	0,4019
17.00	494,1	28	30,2	0,3	18,8	0,3172
%3,0 ZnO/EG-H₂O (40 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	433,2	28	28,7	0,6	19,1	0,1151
10.30	498,3	28	29,0	0,8	21,3	0,1430
11.00	532,9	28	29,4	0,9	21,9	0,1872
11.30	692,0	28	30,2	1,0	22,1	0,2265
12.00	772,3	28	30,5	1,2	22,1	0,2306
12.30	811,1	28	31,4	1,5	22,9	0,2986
13.00	798,6	28	31,6	1,4	23,2	0,3211
13.30	800,0	28	32,8	1,4	23,1	0,4274
14.00	813,8	28	33,4	1,6	23,5	0,4727
14.30	793,1	28	33,7	1,1	23,6	0,5120
15.00	770,9	28	34,0	1,0	23,4	0,5545
15.30	617,3	28	32,5	0,9	21,9	0,5193
16.00	532,9	28	31,6	0,7	20,5	0,4812
16.30	484,4	28	30,8	0,9	19,9	0,4118
17.00	470,6	28	30,1	0,6	19,1	0,3179

%3,0 ZnO/EG-H₂O (60 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	458,1	28	28,6	0,2	19,0	0,1400
10.30	474,7	28	28,7	0,3	19,5	0,1576
11.00	542,6	28	29,0	0,2	20,8	0,1969
11.30	628,4	28	29,5	0,2	21,8	0,2551
12.00	703,1	28	29,8	0,1	22,6	0,2736
12.30	758,5	28	30,3	0,4	22,7	0,3240
13.00	808,3	28	30,6	0,4	22,9	0,3437
13.30	848,4	28	31,5	0,5	23,3	0,4408
14.00	852,6	28	31,9	0,4	23,6	0,4888
14.30	854,0	28	32,2	0,5	23,8	0,5255
15.00	823,5	28	32,4	0,6	23,6	0,5709
15.30	765,4	28	31,8	0,8	23,5	0,5305
16.00	669,9	28	31,2	0,7	23,4	0,5104
16.30	539,8	28	30,2	1,0	22,3	0,4355
17.00	506,6	28	29,6	1,2	19,7	0,3375
%3,0 ZnO/EG-H₂O (60 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	444,3	28	28,6	0,6	18,9	0,1443
10.30	494,1	28	28,7	0,3	20,4	0,1514
11.00	613,1	28	29,1	0,3	21,3	0,1917
11.30	723,9	28	29,7	0,1	22,0	0,2509
12.00	764,0	28	30,0	0,6	22,2	0,2797
12.30	784,8	28	30,4	0,7	22,5	0,3268
13.00	833,2	28	30,7	0,9	22,9	0,3463
13.30	859,5	28	31,5	0,3	23,0	0,4351
14.00	842,9	28	31,9	1,2	22,9	0,4944
14.30	836,0	28	32,2	0,6	23,3	0,5368
15.00	766,8	28	32,1	0,7	23,2	0,5714
15.30	707,3	28	31,5	0,5	22,9	0,5288
16.00	640,8	28	31,1	0,6	21,4	0,5169
16.30	521,8	28	30,1	0,7	20,6	0,4300
17.00	481,7	28	29,5	1,1	19,0	0,3327

%3,0 ZnO/EG-H ₂ O/ (80 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m ²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	454,0	27	27,5	0,6	18,6	0,1569
10.30	480,3	27	27,7	0,9	18,9	0,2076
11.00	650,5	27	28,1	0,9	19,1	0,2409
11.30	664,4	27	28,3	1,0	20,5	0,2788
12.00	696,2	27	28,5	1,4	21,0	0,3070
12.30	779,2	27	29,0	1,2	21,7	0,3657
13.00	829,1	27	29,2	1,0	21,8	0,3781
13.30	863,7	27	29,9	0,9	22,2	0,4784
14.00	862,3	27	30,1	0,7	22,1	0,5122
14.30	826,3	27	30,4	1,2	22,2	0,5863
15.00	761,2	27	30,2	1,5	21,9	0,5990
15.30	740,5	27	29,8	1,0	21,2	0,5387
16.00	722,5	27	29,7	1,2	20,7	0,5324
16.30	607,6	27	29,0	1,3	19,7	0,4690
17.00	508,0	27	28,4	1,1	18,7	0,3927
%3,0 ZnO/EG-H ₂ O/ (80 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m ²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	478,9	27	27,6	1,0	18,5	0,1785
10.30	539,8	27	27,8	0,6	19,0	0,2112
11.00	682,4	27	28,2	0,4	19,2	0,2505
11.30	762,6	27	28,5	1,1	19,6	0,2802
12.00	791,7	27	28,7	1,2	20,7	0,3059
12.30	834,6	27	29,1	1,5	21,5	0,3585
13.00	865,1	27	29,3	1,7	21,7	0,3788
13.30	865,1	27	29,9	1,4	22,3	0,4776
14.00	855,4	27	30,1	1,1	22,5	0,5163
14.30	858,1	27	30,5	0,5	22,0	0,5811
15.00	863,7	27	30,6	0,8	21,9	0,5939
15.30	847,1	27	30,2	0,3	21,4	0,5382
16.00	708,7	27	29,6	0,8	21,2	0,5227
16.30	543,9	27	28,8	0,5	20,1	0,4715
17.00	523,2	27	28,4	1,4	19,6	0,3812

%4,0 ZnO/EG-H₂O (20 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	456,6	28	29,3	0,2	19,3	0,1013
10.30	510,7	28	30,2	0,7	20,8	0,1532
11.00	687,5	28	31,2	0,2	20,9	0,1655
11.30	733,2	28	31,8	0,9	21,7	0,1843
12.00	779,1	28	32,4	1,4	22,3	0,2008
12.30	849,9	28	34,4	0,3	23,0	0,2678
13.00	851,5	28	35,3	1,2	23,1	0,3049
13.30	871,1	28	36,2	1,4	23,5	0,3348
14.00	874,1	28	38,0	1,2	23,6	0,4069
14.30	864,7	28	39,3	1,6	23,2	0,4648
15.00	818,1	28	40,0	1,7	22,5	0,5217
15.30	786,7	28	38,8	1,0	22,4	0,4882
16.00	672,5	28	36,8	1,4	22,3	0,4654
16.30	540,5	28	33,8	1,5	20,8	0,3816
17.00	495,2	28	32,3	0,6	20,1	0,3088
%4,0 ZnO/EG-H₂O (20 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	416,6	28	29,2	0,4	19,1	0,1024
10.30	494,1	28	30,2	0,5	20,8	0,1584
11.00	546,7	28	30,7	0,6	21,6	0,1756
11.30	642,3	28	31,4	0,9	22,1	0,1883
12.00	728,0	28	32,4	0,3	22,8	0,2149
12.30	838,7	28	34,4	0,2	23,7	0,2714
13.00	851,5	28	35,3	0,8	23,7	0,3049
13.30	843,5	28	36,2	1,2	23,6	0,3457
14.00	861,8	28	38,0	1,4	23,4	0,4127
14.30	844,2	28	39,3	0,8	23,6	0,4760
15.00	819,5	28	40,0	0,4	23,3	0,5208
15.30	772,9	28	38,8	0,3	23,5	0,4969
16.00	711,1	28	37,2	0,8	22,7	0,4601
16.30	595,6	28	34,6	0,5	20,7	0,3941
17.00	546,1	28	32,8	0,7	19,3	0,3126

%4,0 ZnO/EG-H₂O (40 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	455,2	28	28,8	0,4	19,0	0,1250
10.30	499,6	28	29,1	0,9	21,4	0,1566
11.00	595,1	28	29,7	0,7	22,3	0,2032
11.30	704,4	28	30,4	0,8	23,1	0,2423
12.00	743,3	28	30,8	0,9	23,4	0,2679
12.30	814,0	28	31,5	1,6	23,7	0,3058
13.00	819,6	28	32,0	0,9	23,5	0,3471
13.30	861,5	28	33,4	1,0	23,6	0,4458
14.00	849,2	28	33,9	1,7	23,7	0,4942
14.30	834,5	28	34,2	0,8	23,8	0,5285
15.00	797,4	28	34,4	0,7	23,5	0,5709
15.30	734,3	28	33,5	0,6	22,6	0,5328
16.00	654,6	28	32,6	0,8	22,5	0,4998
16.30	569,4	28	31,3	1,2	21,9	0,4122
17.00	474,4	28	30,3	1,0	19,9	0,3448
%4,0 ZnO/EG-H₂O (40 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	466,3	28	28,8	0,7	19,0	0,1220
10.30	543,9	28	29,3	0,8	20,9	0,1700
11.00	575,7	28	29,7	1,0	21,3	0,2100
11.30	755,4	28	30,5	0,6	21,8	0,2354
12.00	804,0	28	31,0	0,3	22,7	0,2654
12.30	842,8	28	31,7	1,0	22,9	0,3123
13.00	855,5	28	32,0	0,5	23,2	0,3326
13.30	861,4	28	33,4	1,0	23,3	0,4459
14.00	836,8	28	33,7	1,2	23,5	0,4845
14.30	811,0	28	34,0	1,5	23,9	0,5262
15.00	793,4	28	34,4	1,8	24,3	0,5738
15.30	757,9	28	33,6	1,2	23,2	0,5256
16.00	725,0	28	33,0	0,4	22,4	0,4905
16.30	617,7	28	31,7	0,9	20,4	0,4261
17.00	529,6	28	30,4	0,3	19,0	0,3223

%4,0 ZnO/EG-H₂O (60 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	451,1	28	28,7	0,8	18,9	0,1656
10.30	487,3	28	28,9	0,4	21,6	0,1971
11.00	593,7	28	29,3	0,7	22,4	0,2336
11.30	726,4	28	29,9	0,6	23,1	0,2791
12.00	787,4	28	30,3	0,9	23,6	0,3116
12.30	804,3	28	30,6	0,4	24,0	0,3449
13.00	815,5	28	30,8	0,3	23,9	0,3663
13.30	836,5	28	31,7	0,5	24,1	0,4719
14.00	850,6	28	32,0	0,9	24,5	0,5017
14.30	853,7	28	32,5	1,0	24,0	0,5624
15.00	848,4	28	32,7	0,3	23,7	0,5911
15.30	789,5	28	32,0	0,8	22,7	0,5406
16.00	673,8	28	31,3	0,7	21,7	0,5225
16.30	543,2	28	30,3	0,3	20,4	0,4518
17.00	488,3	28	29,6	0,2	19,4	0,3496
%4,0 ZnO/EG-H₂O (60 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	478,7	28	28,7	0,2	19,9	0,1560
10.30	501,0	28	28,9	0,6	21,5	0,1917
11.00	548,1	28	29,2	0,4	22,1	0,2336
11.30	634,1	28	29,7	0,8	22,8	0,2860
12.00	667,4	28	30,0	0,9	23,3	0,3197
12.30	746,3	28	30,4	0,6	24,1	0,3431
13.00	786,6	28	30,7	0,3	24,5	0,3662
13.30	820,0	28	31,7	0,7	25,4	0,4814
14.00	852,1	28	32,0	0,7	24,1	0,5008
14.30	860,7	28	32,5	0,9	23,9	0,5578
15.00	852,9	28	32,7	1,2	23,5	0,5879
15.30	818,6	28	32,2	0,9	23,0	0,5474
16.00	769,1	28	31,8	0,8	21,2	0,5271
16.30	548,6	28	30,3	0,9	20,6	0,4473
17.00	501,9	28	29,6	1,4	20,2	0,3401

%4,0 ZnO/EG-H₂O (80 lt/sa)						
1. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	498,0	28	28,7	0,6	19,0	0,2000
10.30	556,2	28	29,0	0,2	20,8	0,2558
11.00	593,7	28	29,2	0,8	22,0	0,2875
11.30	732,0	28	29,6	1,0	22,3	0,3109
12.00	801,3	28	29,9	1,1	22,9	0,3373
12.30	833,2	28	30,2	1,6	23,4	0,3756
13.00	859,7	28	30,6	1,0	23,4	0,4302
13.30	875,1	28	31,3	0,6	23,8	0,5364
14.00	884,0	28	31,4	0,9	24,0	0,5471
14.30	876,0	28	31,7	1,4	24,1	0,6009
15.00	847,2	28	31,8	1,5	23,9	0,6381
15.30	749,5	28	31,0	1,8	22,9	0,5694
16.00	664,2	28	30,6	1,1	22,6	0,5569
16.30	619,1	28	30,2	1,3	21,0	0,5055
17.00	544,7	28	29,6	1,6	19,4	0,4179
%4,0 ZnO/EG-H₂O (80 lt/sa)						
2. GÜN						
Saat (sa)	Güneş Işınım Şiddeti (W/m²)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Çevre Sıcaklığı (°C)	Verim
10.00	459,3	28	28,6	0,3	20,4	0,1858
10.30	601,7	28	29,1	0,8	21,2	0,2601
11.00	683,4	28	29,4	0,5	21,8	0,2914
11.30	772,0	28	29,7	0,9	22,5	0,3133
12.00	812,3	28	29,9	0,3	22,7	0,3327
12.30	825,0	28	30,2	0,5	23,2	0,3793
13.00	861,1	28	30,6	1,5	23,2	0,4295
13.30	869,7	28	31,3	1,2	23,6	0,5398
14.00	883,8	28	31,4	0,7	23,8	0,5473
14.30	885,5	28	31,7	0,7	23,9	0,5944
15.00	838,8	28	31,8	0,8	23,6	0,6445
15.30	756,4	28	31,0	1,4	23,3	0,5642
16.00	722,2	28	30,8	1,0	22,0	0,5515
16.30	668,7	28	30,4	1,2	20,8	0,5106
17.00	514,4	28	29,5	1,6	20,0	0,4148

EK AÇIKLAMALAR C.

ÖRNEK HESAPLAMALAR

EG-H₂O baz akışkanının 40 lt/sa'lik hacimsel debisi için saat 13.30'daki örnek hesaplaması aşağıdaki gibidir:

Bu deney 3 Mayıs 2021 günü yapılmıştır. Bunun için aşağıda kullanılmış olan $n=123$ 'tür.

➤ **B Terimini Hesaplama:**

$$B = \frac{(n-1)360}{365} \quad (2.4)$$

$$B = \frac{(123-1)360}{365}$$

$$B = 120,33^\circ$$

➤ **E (zaman sabiti) Terimi Hesaplama:**

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868\cos B - 0,032077\sin B - 0,014615\cos 2B - 0,04089\sin 2B) \quad (2.3)$$

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868\cos 120,33 - 0,032077\sin 120,33 - 0,014615\cos 240,66 - 0,04089\sin 240,66)$$

$$E = 3,25$$

➤ **Güneş Yerel Saati Hesaplama:**

$$GYS = \text{Standart saat} + 4(L_{\text{standart}} + L_{\text{yerel}}) + E \quad (2.2)$$

$$\text{Standart saat} = 13.30$$

$$L_{\text{standart}} = 32,86^\circ$$

$$L_{yere}l=45^{\circ}$$

$$GYS=13.30+4(32,86^{\circ}+45^{\circ})+3,25$$

$$GYS=12.45$$

➤ **Saat Açısı Hesabı:**

$$\omega=15(GYS-12) \quad (2.1)$$

$$\omega=15(12.45-12)$$

$$\omega=6,75^{\circ}$$

➤ **Güneş Eğim Açısı Hesabı:**

$$\delta=23,45\sin\left[\frac{360}{365}(284+n)\right] \quad (2.5)$$

$$\delta=23,45\sin\left[\frac{360}{365}(284+123)\right]$$

$$\delta=15,51^{\circ}$$

➤ **Güneş İrtifa Açısı Hesabı:**

$$\sin \alpha = \cos \varnothing \cos \delta \cos \omega + \sin \varnothing \sin \delta \quad (2.6)$$

$$\sin \alpha = \cos 39^{\circ} \cos 15,51^{\circ} \cos 6,75^{\circ} + \sin 39^{\circ} \sin 15,51^{\circ}$$

$$\sin \alpha = 0,91$$

$$\alpha = 65,5^{\circ}$$

➤ **Güneş Azimut Açısı Hesabı:**

$$\sin(\gamma) = \frac{\sin\omega \cos\delta}{\cos\alpha} \quad (2.7)$$

$$\sin(\gamma) = \frac{\sin 6,75^\circ \cos 15,51^\circ}{\cos 65,5^\circ}$$

$$\sin(\gamma) = 0,27$$

$$\gamma = 15,7^\circ$$

➤ **Geliş Açısı Hesabı:**

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\delta \sin\varnothing \cos\beta - \sin\delta \cos\varnothing \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\varnothing \cos\beta \cos\omega \\ & + \cos\delta \sin\varnothing \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin 15,51^\circ \sin 39^\circ \cos 15^\circ - \sin 15,51^\circ \cos 39^\circ \sin 15^\circ \cos 15,7^\circ \\ & + \cos 15,51^\circ \cos 39^\circ \cos 15^\circ \cos 6,75^\circ + \cos 15,51^\circ \sin 39^\circ \sin 15^\circ \cos 15,7^\circ \cos 6,75^\circ \\ & + \cos 15,51^\circ \sin 15^\circ \sin 15,7^\circ \sin 6,75^\circ \end{aligned}$$

$$\cos\theta = 0,986$$

$$\theta = 9,6^\circ$$

➤ **Optik Verim Hesabı:**

$$h_l = \frac{w^2}{16f} \quad (4.35)$$

$$h_l = \frac{60^2}{16(20,8)}$$

$$h_l = 10,81 \text{ cm} = 0,1081 \text{ m}$$

$$A_l = \left(\frac{2}{3} W h_l\right) + \left[f x W \left(1 + \left(\frac{W^2}{48 f^2} \right) \right) \right] \quad (4.34)$$

$$A_l = \left(\frac{2}{3} (60)(10,81)\right) + \left[20,8 \times 60 \left(1 + \left(\frac{60^2}{48(20,8)^2} \right) \right) \right]$$

$$A_l = 1896,74 \text{ cm}^2 = 0,1896 \text{ m}^2$$

$$A_f = \frac{A_l}{A_c} \quad (4.33)$$

$$A_f = \frac{0,1896}{0,54}$$

$$A_f = 0,35$$

$$\eta_{opt} = \left[\rho_{yy} \tau_c \alpha_a \gamma \right] \left[(1 - A_f \tan(\theta)) \cos(\theta) \right] \quad (4.32)$$

$$\eta_{opt} = [(0,69)(0,9)(0,9)(0,75)] [(1 - 0,35 \tan 9,6^\circ) \cos 9,6^\circ]$$

$$\eta_{opt} = 0,39$$

➤ **Faydalı Enerji Hesabı:**

$$K_l = \sigma \pi d_{cdış} L \epsilon_c (4 x T_{çev}^3) + h_{çev} \pi d_{cdış} L \quad (4.15)$$

$$K_l = 5,67 * 10^{-8} \pi (0,013)(0,9)(0,9)(4 x 305,4^3) + 4,85 \pi (0,013)(0,9)$$

$$K_l = 0,39$$

$$\epsilon_a^* = \left[\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} x \frac{A_{dış}}{A_{ciç}} \right]^{-1} \quad (4.17)$$

$$\varepsilon_a^* = \left[\frac{1}{0,3} + \frac{1-0,9}{0,9} \times \frac{0,036}{0,073} \right]^{-1}$$

$$\varepsilon_a^* = 0,29$$

$$K_2 = (\sigma \pi d_{i\delta} L \varepsilon_a^*) \times \left[1 + \frac{4 \times T_{\text{cev}}^4 \times \pi d_{i\delta} L \times \varepsilon_a^* \times \sigma}{K_1} \right]^{-1} \quad (4.21)$$

$$K_2 = ((5,67 \times 10^{-8}) \pi (0,013) (0,9) (0,29)) \times \left[1 + \frac{4 \times 305,4^4 \times \pi (0,013) (0,9) \times 0,29 \times 5,67 \times 10^{-8}}{0,39} \right]^{-1}$$

$$K_2 = 1,08 \times 10^{-11}$$

➤ Soğurucu Boru İçindeki Isı Transfer Katsayısının Hesabı:

$$Nu = 3,657 + \frac{0,0668 \left(\frac{d_{i\delta}}{L} Re Pr \right)}{1 + 0,04 \left(\frac{d_{i\delta}}{L} Re Pr \right)^{2/3}} \quad (6.16)$$

$$Nu = 3,657 + \frac{0,0668 \left(\frac{0,01}{0,9} (1357,26) (8,33) \right)}{1 + 0,04 \left(\frac{0,01}{0,9} (1357,26) (8,33) \right)^{2/3}}$$

$$Nu = 7,84$$

$$h = \frac{k Nu}{d_{i\delta}} \quad (6.14)$$

$$h = \frac{(0,435)(7,84)}{0,01}$$

$$h = 341,04 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$K_3 = \left[\frac{l}{(\pi d_{i\delta} L) \times h} + \frac{l}{2 \times \dot{m}_{ITA} \times c_{p_{ITA}}} \right]^{-1} \quad (4.26)$$

$$K_3 = \left[\frac{1}{(\pi(0,01)(0,9)) \times 341,04} + \frac{1}{2 \times 0,01172 \times 3297,5} \right]^{-1}$$

$$K_3 = 8,62$$

$$\dot{Q}_k = \left[\eta_{opt} \times \dot{Q}_{güneş} - K_2 \times (T_g^4 - T_{çev}^4) \right] \times \left[1 + \frac{4 \times T_g^3 \times K_2}{K_3} \right]^{-1} \quad (4.36)$$

$$\dot{Q}_k = \left[0,39 \times (838 \times 0,54) - (1,08 \times 10^{-11}) \times (305^4 - 305,4^4) \right] \times \left[1 + \frac{4 \times 305^3 \times (1,08 \times 10^{-11})}{8,62} \right]^{-1}$$

$$\dot{Q}_k = 176,45 \text{ W}$$

➤ **Kolektör Verimi Hesabı:**

$$K_4 = \eta_{opt} \times \left[1 + \frac{4 \times T_g^3 \times K_2}{K_3} \right]^{-1} \quad (4.38)$$

$$K_4 = 0,39 \times \left[1 + \frac{4 \times 305^3 \times (1,08 \times 10^{-11})}{8,62} \right]^{-1}$$

$$K_4 = 0,39$$

$$K_5 = K_2 \times \left[1 + \frac{4 \times T_g^3 \times K_2}{K_3} \right]^{-1} \quad (4.39)$$

$$K_5 = (1,08 \times 10^{-11}) \times \left[1 + \frac{4 \times 305^3 \times (1,08 \times 10^{-11})}{8,62} \right]^{-1}$$

$$K_5 = 1,07 \times 10^{-11}$$

$$\eta_{isil} = K_4 - K_5 \times \left[\frac{(T_g^4 - T_{çev}^4)}{A_c G_T} \right] \quad (4.40)$$

$$\eta_{isil}=0,39-1,07 \times 10^{-11} \times \left[\frac{(305^4-305,4^4)}{(0,54) \times 838} \right]$$

$$\eta_{isil}=0,39$$

➤ **Deneysel Veriler Kullanılarak Hesaplanan Faydalı Enerji Hesabı:**

$$\dot{Q}_{k,2}=\dot{m}_{ITA}c_{p,ITA}(T_{\zeta}-T_g) \quad (4.22)$$

$$\dot{Q}_{k,2}=(0,01172)(3297,5)(309,5-305)$$

$$\dot{Q}_{k,2}=173,91 \text{ W}$$

➤ **Verim Hesabı:**

$$\eta_{isil,2}=\frac{\dot{Q}_{k,2}}{A_c \dot{G}_T} \quad (5.5)$$

$$\eta_{isil,2}=\frac{173,91}{(0,54)(838)}$$

$$\eta_{isil,2}=0,384$$

➤ **Eş. (4.36) ve Eş. (4.22) ile Hesaplanan Faydalı Enerjinin Hata Oranı Hesabı:**

$$\text{Hata oranı (\%)}=\frac{\dot{Q}_k-\dot{Q}_{k,2}}{\dot{Q}_{k,2}} \times 100$$

$$\text{Hata oranı (\%)}=\frac{176,45-173,91}{173,91} \times 100$$

$$\text{Hata oranı}=\%1,46$$

- Eş. (4.40) ve Eş. (5.5) ile Hesaplanan Kolektör Veriminin Hata Oranı Hesabı:

$$Hata\ oranı\ (\%) = \frac{\eta_{isl} - \eta_{isl,2}}{\eta_{isl,2}} \times 100$$

$$Hata\ oranı\ (\%) = \frac{0,39 - 0,384}{0,384} \times 100$$

$$Hata\ oranı = \%1,56$$

ÖZGEÇMİŞ

Recep EKİCİLER ilk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2008 yılında Ankara Kanuni Lisesi'nden mezun oldu. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2012 yılında onur öğrencisi olarak mezun oldu. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak göreve atanmasıyla akademik hayatına başladı. 2014 yılında başlamış olduğu Yüksek Lisans Eğitimini 2016 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamladı. 2016 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. 2018 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır ve aynı yerde akademik hayatına devam etmektedir.