

**GÜNEŞ KOLLEKTÖRLERİNDE NANOAKIŞKAN  
KULLANIMININ ISIL VERİME ETKİSİNİN  
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Yük. Müh. Neşe BUDAK**

**Doktora Tezi  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Halit Lütfi YÜCEL  
ŞUBAT-2016**

T.C  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ KOLLEKTÖRLERİNDE NANOAKIŞKAN KULLANIMININ  
ISIL VERİME ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Neşe BUDAK

(111120201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01 Şubat 2016  
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Şubat 2016

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Halit Lütfi YÜCEL (F.Ü)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Cengiz YILDIZ (F.Ü)  
Prof. Dr. Yasin VAROL (F.Ü)  
Doç.Dr. Zeki ARGUNHAN(B.T.Ü)  
Doç. Dr. Hasan BAYINDIR(D.Ü.)

ŞUBAT-2016

## ÖNSÖZ

Dünya’da giderek artan enerji talebinin karşılanması konusunda sınırlı enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması yönünde yeni yöntemler geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Nanoteknolojik gelişmelerle birlikte üretimi sağlanan nanoakışkanların üstün ısı özellikleri sayesinde termal sistemlerde iş yapan akışkan olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu araştırmalar yeterli düzeyde değildir. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynakları arasında ilk sırada yer alan güneş enerjisinden faydalanarak oluşturulan sıcak su eldesinde kullanılan düzlemsel kollektörlü güneş enerji sistemlerinde nanoakışkan kullanılarak daha verimli sistemlere olanak sağlanabileceği görülmüştür. Çalışmanın ileride yapılacak çalışmalara yol gösterici ve faydalı olmasını temenni ederim.

Hazırladığım bu çalışmada, beni her zaman büyük özveriyle destekleyen ve çalışmamın bütün aşamalarında her türlü yardımı gösteren değerli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Halit Lütfi YÜCEL’ e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamın gerçekleşmesinde önemli katkıları olan Prof. Dr. Cengiz YILDIZ’ a, nanoakışkan sentezi ile ilgili Erzurum Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında çalışma imkanı sağlayan Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ’ e, Prof. Dr. Bayram ŞAHİN’ e, Yrd. Doç. Dr. Eyüphan MANAY, Öğr. Gör. Kadir GELİŞ ve Arş. Gör. Emre MANDEV’ e; Fırat Üniversitesi Biyoloji Bölümü’nden Prof. Dr. Ökkeş YILMAZ’ a; Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi’nden Arş. Gör. Dr. Müjdat FIRAT’a; Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü hocalarıma; Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’ ne ve atölye çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, Proje No: MF.14.24 kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı FÜBAP Koordinasyon Birim Yönetimi’ne teşekkür ederim.

Bu çalışmam sırasında 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Bursu ile beni maddi açıdan destekleyen TÜBİTAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Benim için çok değerli olan, beni her zaman her konuda destekleyen ve hayatıma anlam katan aileme sonsuz teşekkür ederim.

**Neşe BUDAK  
ELAZIĞ - 2016**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                  | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ÖNSÖZ.....                                                                       | II              |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                 | III             |
| ÖZET.....                                                                        | V               |
| SUMMARY.....                                                                     | VI              |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                                                            | VII             |
| TABLolar LİSTESİ.....                                                            | X               |
| SEMBOLLER LİSTESİ.....                                                           | XI              |
| 1. GİRİŞ .....                                                                   | 1               |
| 1.1. Nanoakışkanlar .....                                                        | 18              |
| 1.2. Nanoakışkanların Hazırlanması.....                                          | 21              |
| 1.3. Nanoakışkanların Kararlılığı.....                                           | 22              |
| 1.4. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri.....                             | 24              |
| 1.4.1. Isıl İletkenlik.....                                                      | 24              |
| 1.4.1.1. Isıl İletkenlik Ölçüm Yöntemleri .....                                  | 26              |
| 1.4.1.2. Isıl İletkenliği Etkileyen Faktörler .....                              | 28              |
| 1.4.1.3. Nanoakışkanların Isıl İletkenlik Tahmini İçin Modeller .....            | 32              |
| 1.4.3. Özgül Isı .....                                                           | 38              |
| 1.4.4. Yoğunluk.....                                                             | 39              |
| 1.5. Nanoakışkanların Uygulama Alanları .....                                    | 39              |
| 1.6. Isı Transfer Mekanizmaları .....                                            | 40              |
| 1.6.1. Nanoakışkanlarda Isı Transferi.....                                       | 41              |
| 1.7. Güneş Enerjisi ve Teknolojileri .....                                       | 44              |
| 1.7.1. Isıl Uygulamalar.....                                                     | 45              |
| 1.7.1.1. Düşük Sıcaklık Uygulamaları (20 °C - 100 °C) .....                      | 45              |
| 1.7.1.2. Orta Sıcaklık Uygulamaları (100°C-300 °C) .....                         | 49              |
| 1.7.1.3. Yüksek Sıcaklık Uygulamaları (300 °C ve üzeri) .....                    | 49              |
| 1.7.2. Fotovoltaik Uygulamalar.....                                              | 50              |
| 1.7.3. Güneş Enerjili Sıcak Su Hazırlama Sistemleri.....                         | 52              |
| 1.7.3.1. Sirkülasyon Şekline Göre Güneş Enerjili Sıcak Su Sistemleri .....       | 52              |
| 1.7.3.2. Devre Şekline Göre Güneş Enerjili Sıcak Su Sistemleri .....             | 54              |
| 2. MATERYAL VE METOT .....                                                       | 61              |
| 2.1. Nanoakışkanları Hazırlanması Aşamasında Kullanılan DeneySEL Materyeller. 61 |                 |
| 2.1.1. Nanopartiküller .....                                                     | 61              |
| 2.1.2. Hassas Terazİ.....                                                        | 61              |
| 2.1.3. Ultrasonik Karıştırıcı.....                                               | 62              |

|          |                                                                                            |     |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1.4.   | Ultrasonik Banyo.....                                                                      | 63  |
| 2.2.     | Nanoakışkanları Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Materyeller..... | 63  |
| 2.2.1.   | Isıl İletkenlik Ölçer .....                                                                | 63  |
| 2.2.2.   | Viskozimetre .....                                                                         | 64  |
| 2.3.     | Deney Düzenegi .....                                                                       | 65  |
| 2.3.1.   | Düzlemsel Güneş Kollektörleri .....                                                        | 67  |
| 2.3.3.   | Sirkülasyon Pompası.....                                                                   | 68  |
| 2.3.4.   | Fotovoltaik Pil .....                                                                      | 68  |
| 2.3.5.   | Debimetre.....                                                                             | 69  |
| 2.3.6.   | Isıl Çiftler .....                                                                         | 69  |
| 2.4.     | Deneylerde Kullanılan Ölçme Cihazları .....                                                | 70  |
| 2.4.1.   | Sıcaklık Veri Kayıt Cihazı.....                                                            | 70  |
| 2.4.2.   | Piranometre .....                                                                          | 70  |
| 2.4.3.   | Termo Higrometre .....                                                                     | 71  |
| 2.4.4.   | Anemometre.....                                                                            | 71  |
| 2.5.     | Verilerin Hesaplanması ve Değerlendirilmesi .....                                          | 72  |
| 2.5.1.   | Nanoakışkanların Hazırlanması .....                                                        | 72  |
| 2.5.2.   | Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....                            | 73  |
| 2.5.2.1. | Isıl İletkenliğin Belirlenmesi.....                                                        | 73  |
| 2.5.2.2. | Viskozitenin Belirlenmesi .....                                                            | 73  |
| 2.5.3.   | Kollektör Veriminin Hesaplanması.....                                                      | 73  |
| 2.5.4.   | Hata Analizi .....                                                                         | 75  |
| 3.       | BULGULAR .....                                                                             | 78  |
| 3.1.     | Nanoakışkanların Hazırlanması İle İlgili Hesaplamalar .....                                | 78  |
| 3.2.     | Termofiziksel Özelliklerin Belirlenmesi.....                                               | 79  |
| 3.2.1.   | Isıl İletkenlik Ölçümleri.....                                                             | 79  |
| 3.2.2.   | Viskozite Ölçümleri.....                                                                   | 82  |
| 3.3.     | Kollektör Verim Deneyleri .....                                                            | 84  |
| 3.3.1.   | Gün İçerisinde Sıcaklık-Işınım-Saat Değişimleri.....                                       | 84  |
| 3.3.2.   | Kollektör Verim - $[(T_g - T_o)/G_T]$ Değişimleri .....                                    | 98  |
| 4.       | SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....                                                                 | 115 |
| 5.       | ÖNERİLER .....                                                                             | 117 |
|          | KAYNAKLAR.....                                                                             | 118 |
|          | ÖZGEÇMİŞ .....                                                                             | 129 |

## ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde ilk sırada yer alan güneş enerjisi, gerek çevreci olması gerekse ucuz işletme maliyeti sebebi ile birçok uygulamayla enerjinin daha verimli kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada düzlemsel güneş kolektörlü sıcak su güneş enerji sistemlerinde iş yapan akışkan olarak nanoakışkan ve su seçilerek ısı verime etkileri deneysel olarak incelenmiştir. % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlarında  $Al_2O_3$ , CuO ve  $TiO_2$  nanopartikülleri saf suyun içerisine katılarak nanoakışkanlar hazırlanmış ve hazırlanan nanoakışkanların termofiziksel özellikleri (ısı iletkenlik, viskozite gibi) belirlenmiştir. Isı verimi karşılaştırmak üzere oluşturulan deney düzeneklerinde, verilen konsantrasyonlarda her bir nanoakışkan için 50, 150 ve 250 lt/h debi değerleri ayarlanarak kolektör giriş, çıkış, ortam ve kullanım suyu sıcaklıkları, ısınım, nem, hız gibi veriler ölçülerek kaydedilmiştir. Elde edilen verilerle, ASHRAE 93-2003 standartlarına göre verimler hesaplanmıştır. Sonuçlar, su ile karşılaştırıldığında nanoakışkan kullanımının verimi arttırdığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Nanoakışkanlar, Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri, Güneş Enerjisi, Düzlemsel Kolektör, Isı Verim

## **SUMMARY**

### **Experimental Investigation of the Effect of Thermal Efficiency by Using Nanofluid in Solar Collectors**

Solar energy, which occupies the first place amongst the renewable energy resources, enables a more efficient energy consumption through various applications due to its ecologist nature and cheaper operating costs with the application. In the present work the effect of nanofluid, as working fluid, on the efficiency of a flat-plate solar collector was investigated experimentally. Nanofluids were prepared adding  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$  and  $\text{TiO}_2$  nanoparticles in volume fraction 0.2%, 0.4% and 0.8%, into pure water and thermophysical properties of prepared nanofluids( thermal conductivity, viscosity..) was determined. Temperature of collector input, collector output, ambient and water, radiation, velocity and humidity were measured and recorded to compare the thermal efficiency. The mass flow rate of nanofluids varied from 50 to 250 Lit/h. The ASHRAE standard was used to calculate the efficiency. The results show that, in comparison with water as absorption medium using the nanofluids as working fluid increase the efficiency.

**Key Words:** Nanofluids, Thermophysical Properties Of Nanofluids, Solar Energy, Flat Plate Solar Collector, Thermal Efficiency

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Hacimsel oran ve sıcaklığın ısı iletkenlik üzerindeki etkisi.....                                                                                                     | 4  |
| Şekil 1.2. Hacimsel oranın viskozite üzerindeki etkisi .....                                                                                                                     | 6  |
| Şekil 1.3. Ülkelere göre toplam kollektör alanı ve toplam kapasite.....                                                                                                          | 13 |
| Şekil 1.4. Türkiye Güneş enerjisi potansiyel atlası ve beş il için bazı değerler .....                                                                                           | 13 |
| Şekil 1.5. Düzlemsel güneş kollektörleri .....                                                                                                                                   | 14 |
| Şekil 1.6. Elazığ ili için iklim grafiği .....                                                                                                                                   | 14 |
| Şekil 1.7. Uzunluk ölçeği ve ilgili bazı örnekler .....                                                                                                                          | 18 |
| Şekil 1.8. Nanopartiküllere ait elektron mikroskobu görüntüleri a) altın çekirdek-silika kabuk nanopartiküller b) altın nanoçubuklar c) iç boşluklu platin nanopartiküller ..... | 19 |
| Şekil 1.9. Nanopartiküllerin mikropartiküllerle karşılaştırılması.....                                                                                                           | 21 |
| Şekil 1.10. Tek adım yöntemiyle nanoakışkan hazırlanması .....                                                                                                                   | 21 |
| Şekil 1.11. İki adım yöntemiyle nanoakışkan hazırlanması .....                                                                                                                   | 22 |
| Şekil 1.12. a) Topaklanmış, b) homojene yakın dağılmış CuO partikülleri.....                                                                                                     | 23 |
| Şekil 1.13. Geçici sıcak tel yöntemi deney düzeneği .....                                                                                                                        | 26 |
| Şekil 1.14. Lee Disk yönteminin şematik gösterimi .....                                                                                                                          | 27 |
| Şekil 1.15. Searle yönteminin şematik gösterimi .....                                                                                                                            | 27 |
| Şekil 1.16. a) $Al_2O_3$ -su b) CuO- su nanoakışkanlarının hacim konsantrasyonunun ısı iletkenlik artış oranına etkisi .....                                                     | 28 |
| Şekil 1.17. a) $Al_2O_3$ -su b) CuO-su nanoakışkanının pH değerlerinin ısı iletkenlik artış oranına etkisi .....                                                                 | 29 |
| Şekil 1.18. $Al_2O_3$ -su nanoakışkanında sıcaklığın ısı iletkenlik artış oranına etkisi .....                                                                                   | 29 |
| Şekil 1.19. Temel akışkanın ısı iletkenlik artış oranına etkisi.....                                                                                                             | 30 |
| Şekil 1.20. a) Su ve b) Etilen glikol temel akışkanları için partikül malzemesinin ısı iletkenlik artış oranına etkisi .....                                                     | 30 |
| Şekil 1.21. CuO-su nanoakışkanı için partikül boyutunun ısı iletkenlik artış oranına etkisi .                                                                                    | 31 |
| Şekil 1.22. a) SiC-su b) SiC-EG nanoakışkanları için partikül şeklinin ısı iletkenlik artışına etkisi .....                                                                      | 31 |
| Şekil 1.23. $Al_2O_3$ /su nanoakışkanı için farklı partikül hacim oranlarında ısı iletkenlik oranına etkisi .....                                                                | 32 |
| Şekil 1.24. Nanoakışkanların ısı transfer özellikleri .....                                                                                                                      | 42 |
| Şekil 1.25. Isıl sınır tabaka gelişimi .....                                                                                                                                     | 43 |
| Şekil 1.26. Hidrodinamik sınır tabaka gelişimi.....                                                                                                                              | 44 |
| Şekil 1.27. Güneş havuzu örneği.....                                                                                                                                             | 46 |
| Şekil 1.28. Güneş bacası örneği .....                                                                                                                                            | 47 |
| Şekil 1.29. Su arıtma sistemi örneği.....                                                                                                                                        | 47 |
| Şekil 1.30. Güneş mimarisi örneği .....                                                                                                                                          | 48 |
| Şekil 1.31. Sera örneği .....                                                                                                                                                    | 48 |
| Şekil 1.32. Güneş ocağı örneği.....                                                                                                                                              | 49 |
| Şekil 1.33. Şebekeden bağımsız bir fotovoltaiik sistemin şeması.....                                                                                                             | 51 |
| Şekil 1.34. a) Tabii taşınımli sistem b) Zorlanmış (cebri) taşınımli sistem .....                                                                                                | 53 |
| Şekil 1.35. a) Açık sistem b) Kapalı sistem .....                                                                                                                                | 54 |
| Şekil 1.36. Vakum tüplü kollektör ve çalışma şekli.....                                                                                                                          | 55 |
| Şekil 1.37. Düzlemsel güneş kollektör yapısı .....                                                                                                                               | 56 |
| Şekil 1.38. Düz yüzeyli güneş kollektörü ısı akış şemaları.....                                                                                                                  | 57 |
| Şekil 1.39. Düz kollektörlerde ısı geçişinin elektrik benzeşimi .....                                                                                                            | 59 |
| Şekil 2.1. Hassas terazi.....                                                                                                                                                    | 62 |

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.2. Ultrasonik karıştırıcı .....                                                          | 62 |
| Şekil 2.3. Ultrasonik banyo .....                                                                | 63 |
| Şekil 2.4. KD2 Pro cihazı.....                                                                   | 63 |
| Şekil 2.5. Viskozimetre .....                                                                    | 65 |
| Şekil 2.6. Deney düzeneği.....                                                                   | 65 |
| Şekil 2.7. Deney düzeneğinin şematik görünümü.....                                               | 66 |
| Şekil 2.8. Düz yüzeyli güneş kollektörü .....                                                    | 67 |
| Şekil 2.9. Tek serpantinli boyler ve iç kesiti .....                                             | 68 |
| Şekil 2.10. Sirkülasyon pompası .....                                                            | 68 |
| Şekil 2.11. Fotovoltaik pil .....                                                                | 69 |
| Şekil 2.12. a) Elektromanyetik debimetre b) Debimetre.....                                       | 69 |
| Şekil 2.13. Sıcaklık veri kayıt cihazı.....                                                      | 70 |
| Şekil 2.14. Piranometre .....                                                                    | 70 |
| Şekil 2.15. Termo Higrometre.....                                                                | 71 |
| Şekil 2.16. Anemometre.....                                                                      | 71 |
| Şekil 3.1. Hazırlanan $Al_2O_3$ nanoakışkanlarının resimleri .....                               | 78 |
| Şekil 3.2. Hazırlanan $CuO$ nanoakışkanlarının resimleri .....                                   | 79 |
| Şekil 3.3. Hazırlanan $TiO_2$ nanoakışkanlarının resimleri .....                                 | 79 |
| Şekil 3.4. $Al_2O_3$ -su nanoakışkanının ısı iletkenliğinin modeller ile karşılaştırılması ..... | 80 |
| Şekil 3.5. $CuO$ -su nanoakışkanının ısı iletkenliğinin modeller ile karşılaştırılması .....     | 80 |
| Şekil 3.6. $TiO_2$ -su nanoakışkanının ısı iletkenliğinin modeller ile karşılaştırılması.....    | 81 |
| Şekil 3.7. $Al_2O_3$ -su nanoakışkanının viskozitesinin modeller ile karşılaştırılması .....     | 82 |
| Şekil 3.8. $CuO$ -su nanoakışkanının viskozitesinin modeller ile karşılaştırılması .....         | 83 |
| Şekil 3.9. $TiO_2$ -su nanoakışkanının viskozitesinin modeller ile karşılaştırılması.....        | 83 |
| Şekil 3.10. % 0.2 $Al_2O_3$ hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler.....           | 85 |
| Şekil 3.11. % 0.2 $Al_2O_3$ hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler.....           | 86 |
| Şekil 3.12. % 0.2 $Al_2O_3$ hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler.....            | 86 |
| Şekil 3.13. % 0.4 $Al_2O_3$ hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler.....           | 86 |
| Şekil 3.14. % 0.4 $Al_2O_3$ hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler.....           | 87 |
| Şekil 3.15. % 0.4 $Al_2O_3$ hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler.....            | 87 |
| Şekil 3.16. % 0.8 $Al_2O_3$ hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler.....           | 88 |
| Şekil 3.17. % 0.8 $Al_2O_3$ hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler .....          | 88 |
| Şekil 3.18. % 0.8 $Al_2O_3$ hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler .....           | 89 |
| Şekil 3.19. % 0.2 $CuO$ hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler.....               | 89 |
| Şekil 3.20. % 0.2 $CuO$ hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler.....               | 90 |
| Şekil 3.21. % 0.2 $CuO$ hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler.....                | 90 |
| Şekil 3.22. % 0.4 $CuO$ hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler.....               | 91 |
| Şekil 3.23. % 0.4 $CuO$ hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler.....               | 91 |
| Şekil 3.24. % 0.4 $CuO$ hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler.....                | 92 |
| Şekil 3.25. % 0.8 $CuO$ hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler.....               | 92 |
| Şekil 3.26. % 0.8 $CuO$ hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler.....               | 93 |
| Şekil 3.27. % 0.8 $CuO$ hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler .....               | 93 |
| Şekil 3.28. % 0.2 $TiO_2$ hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler.....             | 94 |
| Şekil 3.29. % 0.2 $TiO_2$ hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler.....             | 94 |
| Şekil 3.30. % 0.2 $TiO_2$ hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler.....              | 95 |
| Şekil 3.31. % 0.4 $TiO_2$ hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler.....             | 95 |
| Şekil 3.32. % 0.4 $TiO_2$ hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler.....             | 96 |
| Şekil 3.33. % 0.4 $TiO_2$ hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler.....              | 96 |
| Şekil 3.34. % 0.8 $TiO_2$ hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler .....            | 97 |
| Şekil 3.35. % 0.8 $TiO_2$ hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler.....             | 97 |

|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 3. 36. % 0.8 TiO <sub>2</sub> hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler.....                                                                | 98  |
| Şekil 3.37. % 0.2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi. | 99  |
| Şekil 3.38. % 0.4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi  |     |
| Şekil 3.39. % 0.8 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi  | 100 |
| Şekil 3.40. % 0.2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi | 101 |
| Şekil 3.41. % 0.4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi | 101 |
| Şekil 3.42. % 0.8 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi | 102 |
| Şekil 3.43. % 0.2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi |     |
| Şekil 3.44. % 0.4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi | 102 |
| Şekil 3.45. % 0.8 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi | 103 |
| Şekil 3.46. % 0.2 CuO-su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi.                             | 104 |
| Şekil 3.47. % 0.4 CuO-su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi.                             | 105 |
| Şekil 3.48. % 0.8 CuO-su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi                              | 106 |
| Şekil 3.49. % 0.2 CuO-su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi                             | 106 |
| Şekil 3.50. % 0.4 CuO-su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi                             | 106 |
| Şekil 3.51. % 0.8 CuO-su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi                             | 107 |
| Şekil 3.52. % 0.2 CuO-su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi                             | 107 |
| Şekil 3.53. % 0.4 CuO-su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi                             |     |
| Şekil 3.54. % 0.8 CuO-su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi                             |     |
| Şekil 3.55. % 0.2 TiO <sub>2</sub> -su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi.               | 109 |
| Şekil 3.56. % 0.4 TiO <sub>2</sub> -su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi                |     |
| Şekil 3.57. % 0.8 TiO <sub>2</sub> -su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi                |     |
| Şekil 3.58. % 0.2 TiO <sub>2</sub> -su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi               |     |
| Şekil 3.59. % 0.4 TiO <sub>2</sub> -su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi               | 111 |
| Şekil 3.60. % 0.8 TiO <sub>2</sub> -su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi               | 112 |
| Şekil 3.61. % 0.2 TiO <sub>2</sub> -su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi               | 112 |
| Şekil 3.62. % 0.4 TiO <sub>2</sub> -su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi               | 113 |
| Şekil 3.63. % 0.8 TiO <sub>2</sub> -su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim - (T <sub>g</sub> - T <sub>o</sub> )/G <sub>T</sub> değişimi               | 113 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1.1. Nanoakışkanların taşınım ısı transferi ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların özeti | 9  |
| Tablo 1.2. Farklı katı ve sıvıların ısı iletkenlikleri.....                                      | 25 |
| Tablo 1.3. Katı/sıvı süspansiyonları için efektif ısı iletkenlik modelleri .....                 | 33 |
| Tablo 1.4. Katı/sıvı süspansiyonları için viskozite modelleri .....                              | 34 |
| Tablo 2.1. Çalışmada kullanılan nanopartiküllerin özellikleri .....                              | 61 |
| Tablo 2.2. KD2 Pro Isıl özellik ölçerin teknik özellikleri .....                                 | 64 |
| Tablo 2.3. Deneyler sırasında meydana gelen toplam hata miktarları .....                         | 77 |
| Tablo 3.1. Nanopartiküllerin oranları ve miktarları .....                                        | 78 |

## SEMBOLLER LİSTESİ

|              |                                                           |
|--------------|-----------------------------------------------------------|
| $A_t$        | : Kollektör yüzey alanı ( $m^2$ )                         |
| $C_m$        | : Kütleli oran                                            |
| $c_p$        | : Sıvının özgül ısısı ( $J/kgK$ )                         |
| $C_v$        | : Hacimsel oran                                           |
| $F_R$        | : Kollektör ısı transfer faktörü                          |
| $G_T$        | : Güneş ışıması ( $W/m^2$ )                               |
| $h$          | : Isı taşınım katsayısı ( $W/m^2K$ )                      |
| $I_e$        | : Kollektör üzerine gelen anlık güneş ışıması ( $W/m^2$ ) |
| $k$          | : Isı iletim katsayısı ( $W/mK$ )                         |
| $L$          | : Uzunluk (m)                                             |
| $m_n$        | : Nanoakışkan kütlesi (kg)                                |
| $m_p$        | : Nanopartikül kütlesi (kg)                               |
| $Pr$         | : Prandtl sayısı                                          |
| $q'$         | : Birim uzunluk başına ısı transferi miktarı ( $W/m$ )    |
| $Q_g$        | : Yutucu plakaya gelen ışıma enerjisi (W)                 |
| $Q_f$        | : Akışkana aktarılan faydalı enerji (W)                   |
| $Q_d$        | : Depolanan enerji (W)                                    |
| $Q_k$        | : Toplam ısı kaybı (W)                                    |
| $T_{\phi}$   | : Kollektör çıkış sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )               |
| $T_g$        | : Kollektör giriş sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )               |
| $T_{n\phi}$  | : Nanoakışkan kollektör çıkış sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )   |
| $T_{ng}$     | : Nanoakışkan kollektör giriş sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )   |
| $U_L$        | : Kollektördeki ısı transfer kayıp katsayısı ( $W/m^2K$ ) |
| $V_n$        | : Nanoakışkanın hacmi ( $m^3$ )                           |
| $V_p$        | : Partikülün hacmi ( $m^3$ )                              |
| $\mu_{nf}$   | : Nanoakışkanın dinamik (mutlak) viskozitesi (cP)         |
| $\mu_w$      | : Suyun dinamik (mutlak) viskozitesi (cP)                 |
| $\tau\alpha$ | : Yutma–geçirme katsayısı                                 |
| $\phi$       | : Hacimsel oran                                           |
| $\mu$        | : Akışkanın dinamik viskozitesi ( $kg/ms$ )               |
| $\eta_t$     | : Anlık kollektör verimi                                  |
| $\rho_p$     | : Nanopartikülün yoğunluğu ( $kg/m^3$ )                   |

**$\rho_n$**  : Nanoakışkanın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

**$\rho$**  : Akışkan yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

#### **Alt İndisler**

**bf** : Temel akışkan

**e** : Efektif

**l** : Temel Akışkan

**m** : Kütleli

**n** : Nanoakışkan

**s** : Yüzey

**o** : Ortam

**p** : Partikül

**v** : Hacimsel

## 1.GİRİŞ

Teknolojik gelişmelerle birlikte son yıllarda sanayi sektöründe her geçen gün artan bir enerji talebi mevcuttur. Günlük yaşantının da en önemli girdilerinden olan enerjiye talep sürekli olarak artarken enerji kaynakları da hızlı bir şekilde tükenmektedir. Bu doğrultuda mevcut enerji dönüşüm sistemlerinin yeniden gözden geçirilip var olan sınırlı enerji kaynaklarından daha çok yararlanabilmek için yeni yöntemler geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Mevcut yöntemler arasında aktif (dış güç kaynağının kullanılmasını gerektiren, ısı transfer edilen akışkana veya ortama ilave enerji verilerek ısı transferinde iyileşme sağlayan), pasif (ilave enerji verilmeden ısı transferindeki iyileşmeyi sağlayan) ve karma (aktif veya pasif yöntemlerden iki veya daha fazlasını birlikte kullanan) yöntemlerle ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalar literatürde çokça mevcuttur. Bu çalışmalarda çoğunlukla kullanılan geleneksel ısı transfer akışkanları su, sentetik yağlar ve etilen glikol (antifriz) vs. dir. Ancak, bu ısı transfer akışkanlarının performanslarının düşük olması nedeniyle ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmaları kısıtlamaktadır. Bu sebeple son yıllarda araştırmacılar yeni nesil ısı transfer akışkanları üzerinde çalışmaktadır. Yapılan çalışmalarda iş yapan temel akışkan içerisine katı parçacıkların süspansiyon şeklinde katılması yeni yöntemlerden biridir. Akışkan içine milimetre (mm) ve mikrometre ( $\mu\text{m}$ ) boyutlarında parçacık katılması çok daha önceleri de denenmiş bir yöntemdir[1]. Ancak bu yöntemde, yüksek hacimsel oranlarda boru kanal içerisindeki büyük basınç düşümleri, tortulaşma, büyük parçacıklarda hızla çökme ve aşınma gibi problemlerden dolayı endüstriyel işlemlerde bu uygulamalar cazip bulunmamıştır. Ayrıca bu boyuttaki parçacıklarla hazırlanan süspansiyonların daha az kararlı bir yapı göstermeleri nedeniyle mikro kanallarda tıkanmalara neden olduğu gözlenmiştir.

Günümüzde nanoteknolojik gelişmeler, nanometre boyutlarında partikül üretimine olanak sağladığından akışkan içine partiküllerin katılması yeniden gündeme gelmiştir. Özellikle metalik nanopartiküllerin üretiminde kullanılan yöntemler; mikroemülsiyon teknikleri, gaz fazından üretim teknikleri olan asal gaz yoğunlaştırma, kimyasal buhar yoğunlaştırma ve hidrojen redüksiyonu gibi yöntemlerdir[2]. Üretilen bu nanopartiküller (1-100 nm boyutlu) ile geleneksel ısı transfer akışkanları su, sentetik yağ ve etilen glikol gibi bazı temel akışkanlar belirli hacimsel veya kütsel oranlarda karıştırılarak yeni akışkanlar elde edilmektedir. Bu akışkanlar nanoakışkan olarak adlandırılmaktadır. Nanoakışkan terimini nanoparçacıkların süspanse edildiği akışkan olarak çalışmasında ilk kullanan Choi [3], küçük hacimsel oranlarda

(% 1 den daha az) nanopartikül eklenmesi durumunda akışkanın ısı iletkenliğinin yaklaşık olarak iki katına çıktığını göstermiştir.

İş yapan akışkan içerisinde nanopartiküllerin katılması ile ısı transferi performansı önemli derecede iyileşmektedir. Buna sebep olan temel fiziksel olaylar aşağıdaki gibi sıralanabilir [4]:

- Akışkan içerisinde katılan nanopartiküller akışkanın yüzey alanını ve ısı kapasitesini artırır.
- Akışkana ilave edilen partiküller akışkanın efektif ısı kapasitesini artırır.
- Partiküller arasındaki etkileşim ve çarpışmalar akışkanın ve akış geçit yüzeyinin artmasına sebep olur.
- Akışkan içindeki çalkantılar ve türbülans artar.
- İş yapan akışkan içerisinde nanopartiküller akışkanın akışa dik doğrultudaki sıcaklık gradyeninin düzleşmesine neden olur.

Ayrıca nanopartiküller nanoakışkan içerisindeki enerji taşınımını artırır. Bunun sebebi iki bakış açısıyla açıklanabilir. Birincisi süspansiyon edilen nanopartiküller akışkanın bileşimini değiştirir ve temel akışkan süspansiyona dönüştürür. Bu nedenle enerji taşıma proseslerini etkilerler. İkincisi süspansiyon edilmiş partiküllerin rastgele hareketleridir. Partiküllerle sıvı moleküller arasındaki ara yüzeysel etkileşim, akışkan içerisinde enerji taşınımını artırır. Partiküller arasındaki etkileşim ve çarpışmalar akış geçit yüzeyinin, çalkantı ve türbülans şiddetinin artmasına neden olur. Daha yüksek ısı iletimiyle birlikte çalkantı şiddeti ve geniş yüzey alanı daha çok ısı transferine izin verir [5]. Isı transferini iyileştirmeye yardımcı olan nanopartiküllerin, nanoakışkanın karakteristiğini nasıl değiştirdiğinin incelerken nanoakışkan kavramının, nanoakışkanların hazırlanmasının, nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin ve ısı transferi ölçüm tekniklerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Bunlardan ilki nanoakışkanın hazırlanması aşamasıdır. Nanoakışkanın hazırlanması için iki yöntem vardır. Birincisi tek adım yöntemi, ikincisi iki adım yöntemidir. Tek adım metodunun ana fikri temel akışkan içerisinde nanopartikül üretimidir. Fakat kuru nanopartikül elde etmek için akışkandan partikülü ayırmak zordur. İki adım metodunda önceden hazırlanmış olan nanopartiküller temel akışkan içerisine uygun yöntemlerle karıştırılarak süspansiyon oluşturulur. Tek adım metodu ile karşılaştırıldığında iki adım metodu metalik partiküller için daha az uygun olmasına karşın oksit nanopartiküller için iyi sonuç vermektedir. Nanoakışkan süspansiyonu üç şekilde; yüzey aktivatörleri ve/veya seyrelticiler kullanarak, süspansiyonun pH değerini

değiştirerek, ultrasonik titreşimler kullanarak hazırlanabilir. Bu tekniklerle, süspansiyon edilen partiküllerin yüzey özelliklerini değiştirmek ve kararlı süspansiyon elde etmek için partikül kümelenmesini önlemek amaçlanır zira nanoakışkan basit bir sıvı-katı süspansiyonu değildir [6].

Zhu ve ark. [7] tek adım yöntemiyle  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ile topaklanmamış ve kararlı Cu nanoakışkanını elde etmişlerdir. % 0.3 hacimsel oranlı Cu ve etilen glikol ile hazırlanan nanoakışkanın ısı iletkenliğinde % 40 iyileşme Eastman ve ark.[8] tarafından ölçülmüştür.  $\text{TiO}_2$ , CuO ve Cu gibi çeşitli nanopartikül içeren nanoakışkan üretebilmek için kullanılan bir diğer tek adım metodunun toz altı nanopartikül sentezi olduğu bildirilmiştir [9-11]. Bu yöntemle nanopartiküller, katının elektrodta alınan ısı ile ısıtılması sonucu üretilmekte ve sonrasında vakum odasında sıvı hale yoğunlaştırılmasıyla nanoakışkan üretilmiştir.

Wen ve Ding [12]  $\gamma$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ile deiyonize su nanoakışkanını iki adım metoduyla hazırlarken dağıtıcı olarak sodyum dodikilbenzen sülfonat kullanmışlardır.

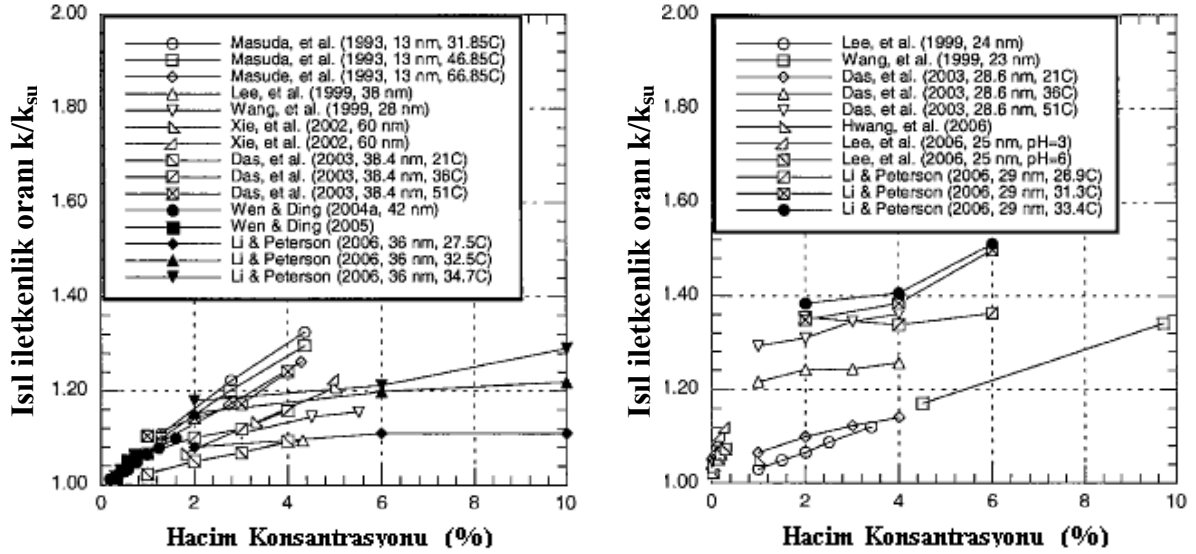
Liu ve ark. [13] karbon nanotüp ve sentetik motor yağı ile farklı oranlarda nanoakışkanın kararlılığı için N-hidroksisüksinimid kullanarak ultrasonik titreşimlerle iki adım yöntemiyle hazırlamışlardır.

Uzun süre kararlılığını koruyan ve akışkanın kimyasal özelliklerinin sabit kaldığı bir karışım elde etmeye çalışan araştırmacılar yaptıkları çalışmalarla topaklanma, akışı engelleme ve tortulaşma gibi problemleri gidermeyi hedeflemişlerdir. Aynı zamanda düşük nanopartikül hacimsel oranlı (%1 den daha az) geleneksel ısı transfer akışkanlarının ısı iletkenliklerinin de, temel akışkana oranla yaklaşık 2 kat daha fazla olduğu görülmüştür[14]. Nanoakışkanın ısı iletkenliği; nanoakışkanın viskozitesine, sıcaklığa, temel akışkanın ısı iletkenliğine, katı partiküle (partikül şekli, boyutu, yoğunluğu, gizli ısı gibi) ve nanopartikülün hacimsel oranına bağlıdır. Yapılan deneysel çalışmalar hacimsel oranın ısı iletkenlik üzerindeki etkisinin genel olarak artan bir eğilim trendinde olduğunu göstermektedir.

Xie ve ark. [15] partikül boyutu 26 ile 600 nm arasında değişen, oksit olmayan seramik nanopartiküllü nanoakışkanı (SiC) ayrıca Xie ve ark. [16] partikül boyutu 1.2 ile 302 nm arasında olan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoakışkanı üreterek partikül boyutunun ısı iletkenliğe etkisini gözlemlemişlerdir.

Hrishikesh ve ark. [17] farklı nanopartiküller ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CuO, Cu, Al), farklı temel akışkanlar(motor yağı, etilen glikol,su), farklı partikül boyutları(11, 31, 45, 80, 150 nm), farklı hacimsel oranlarda (%0.5, %1, % 2, %3) ve farklı sıcaklıklarda (20, 30, 40, 50°C) yaptıkları deneylerde düşük hacimsel oranlarda lineer olmayan trendle beraber daha yüksek

ısı iletkenlik elde etmişlerdir. Dolayısıyla sıcaklığın ısı iletkenlik üzerinde direkt olarak etkisi olmamakla beraber genel olarak artan bir eğilim trendinde olduğunu göstermektedir. Kang ve ark. [18] 30 ve 50 nm çaplarında elmas nanopartikülleriyle % 1.2 hacimsel oranlı etilen glikolle hazırladıkları nanoakışkanın ısı iletkenliğinde % 75 artış gözlemlemişlerdir. Yapılan çeşitli çalışmalarda  $Al_2O_3$ -su, CuO-su hacimsel oran ve sıcaklığın ısı iletkenlik üzerindeki etkisini gösteren grafikleri Şekil 1.1.'de birleştirilmiştir [19].



Şekil 1.1. Hacimsel oran ve sıcaklığın ısı iletkenlik üzerindeki etkisi

İki fazlı karışımlar için önerilen bazı ampirik korelasyonlar bulunmasına rağmen, nanoakışkanın ısı özelliğini belirlemeye yönelik karmaşık bir teori şu ana kadar geliştirilebilmiş değildir. Nanoakışkanların ısı iletkenliğini belirlemeye yönelik teoriler olmadığından, yapılan çalışmalarda iki fazlı karışımlar için mevcut modeller ile ölçülmüş ısı iletkenlikler kıyaslanmıştır. Yapılan çalışmalarda elde edilen ölçüm sonuçları Hamilton-Crosser, Maxwell, Wasp, Yu ve Choi ve Bruggeman modelleriyle karşılaştırılmıştır. Düşük ısı iletkenlikli temel akışkanda ısı iletkenlikte daha fazla artış görülmüştür. Farklı şekillerdeki CuO,  $Al_2O_3$ , ZnO ve Cu partikülleriyle % 0.0' den % 3.0 konsantrasyonlarda ürettikleri nanoakışkanların ısı iletkenliklerini ölçerek temel akışkan olarak kızgın yağın sudan çok daha fazla ısı performans gösterdiğini tespit etmişlerdir [20].

Zhu ve ark.[21]  $Fe_3O_4$  sulu nanoakışkanının ısı iletkenliğinin hacimsel oran üzerinde lineer olmayan etkisini (düşük oranlarda yüksek ısı iletkenlik) elde etmişlerdir. Murshed ve ark. [22] alüminyum- motor yağı nanoakışkanının (80 nm) sıcaklık etkisini incelemişlerdir. Hwang ve ark. [23]  $TiO_2$  (25 nm),  $Al_2O_3$  (48 nm), Fe (10 nm) ve  $WO_3$  (38 nm)

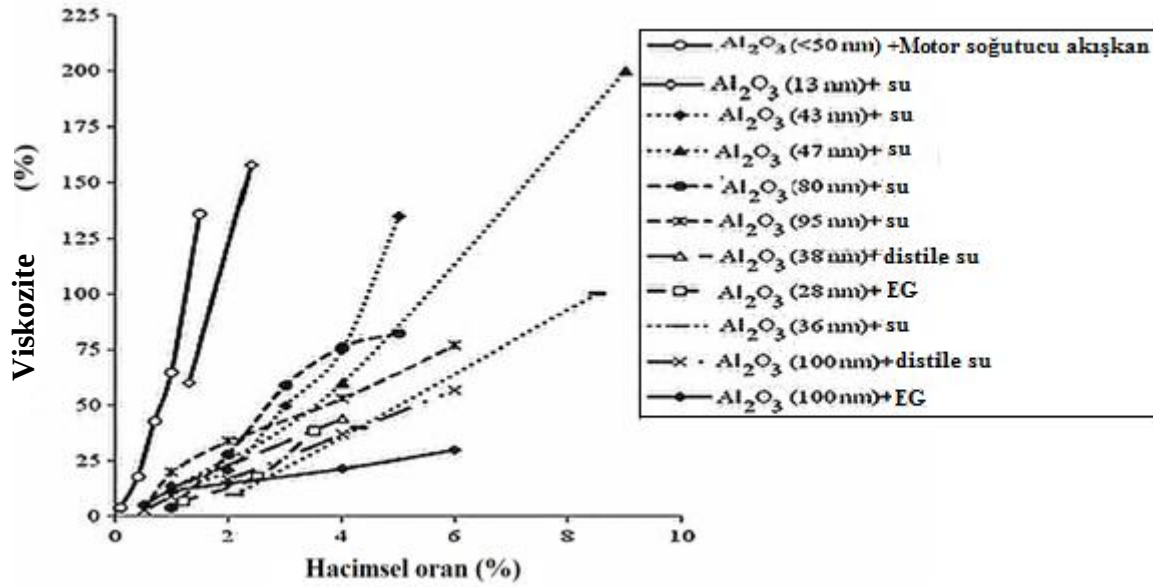
nanoakışkanlarda (özellikle Fe ve  $\text{WO}_3$ ) yüksek ısı iletkenlik gözlemlemişlerdir. Diğer taraftan; Zhang ve ark.[24] ne ısı iletkenlik ve yayınımda ne de sıcaklık etkisinde Hamilton–Crosser modelindeki öngörüler gibi herhangi bir iyileşme elde etmemişlerdir. Benzer sonuçlar Zhang ve ark.[25]  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{CuO}$  nanoakışkanları için de tespit etmişlerdir. Xie ve ark.[16] ısı iletkenliğin pH değerindeki fark kadar arttığını belirten ilk çalışma grubudur. Lee ve ark.[26]  $\text{CuO}$  nanopartikülünden hazırladıkları nanoakışkanın  $k$  değerinin, pH değerine güçlü bir şekilde bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Nanoakışkanların gelişmiş ısı iletkenlikleri, yüksek soğutma oranları, düşük pompalama gücü, daha küçük ve hafif soğutma sistemleri, düşük sürtünme katsayısı ve geliştirilmiş aşınma direnci gibi birçok fayda sağladığı görülmüştür. Son zamanlarda sürtünme ile ilgili yapılan çalışmalar, nanopartikül ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{TiO}_2$ , elmas, vs.) katkılı yağlama yağlarının yük-taşıma kapasitesi, aşınma önleyici ve sürtünme azaltıcı özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir[27-28]. Bu özellikler nanoakışkanları; imalat, ulaşım, enerji, ve elektronik dahil, v.b. sanayideki birçok soğutma yağlama uygulamalarında cazip hale getirmiştir.

Akışkanların en önemli akış özelliklerinden biri olan viskozite, nanoakışkanların pompalama gücü, basınç kaybı ve konvektif ısı transferi ile direkt olarak ilgilidir. Akışkan içerisine partikül eklenmesi ısı iletkenlikle birlikte akışkan viskozitesini de artırmaktadır. Viskoziteyi tahmin etmek için ilk olarak Einstein [29] tarafından 1906 yılında geliştirilmiş modelden sonra çok sayıda model geliştirilmiştir. Krieger ve Dougherty, Mooney, Batchelor, Nielsen, Brinkman, Franken ve Acrivos, Lundgren, Graham, Kitano, Bicerano, Ward, Tseng ve Chen, Avsec ve Oblac, Yu ve Choi, Chen, Masoumi, Pak ve Cho, Kulkarni, Nguyen, Namburu gibi araştırmacıların geliştirdikleri modellerin bir kısmının uygun olduğu, bazılarının ise uygun olmadığı görülmektedir[30]. Bu durum çalışılan partiküllerin geometrik ve kimyasal özellikleri, nanoakışkan hazırlama yöntemi ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir.

Tavman ve Turgut [31] farklı hacimsel oran ve sıcaklıklarda  $\text{SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--H}_2\text{O}$  nanoakışkanlarının viskozitelerini incelemişlerdir. Artan hacimsel oran ile viskozitede de artış gözlemlemişlerdir.  $\text{TiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  nanoakışkanında artan sıcaklıkla viskozitenin azaldığı, su ile benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Deney sonuçları  $\text{SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  nanoakışkanı için Einstein modeli, Krieger-Dougherty modeli ve Nielsen modeline göre önemli ölçüde yüksek ve ayrıca  $\text{TiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  nanoakışkanı için Einstein modeline göre daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Teorik modellerin yanı sıra araştırmacılar yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda nanoakışkanın viskozitesinin partikül boyutu ve şekli, sıcaklık, dağıtıcı ve pH ile direkt olarak ilgili olduğunu belirtmişlerdir.

Nguyen ve ark. [32] partikül boyutunun viskozite üzerindeki etkisini alüminyum-su nanoakışkanında çalışmışlardır. Çalışmalarında % 4'lük hacimsel oranda 36 ve 47 nm boyutlu partiküller için aynı sonuçlar elde etmişlerdir. Hacimsel oran arttıkça büyük boyutlu partiküllü akışkanın viskozitesinin küçük boyutlu olana göre daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Duangthongsuk ve Wongwises [33]  $\text{TiO}_2$  – su nanoakışkanı için 15 – 53°C sıcaklık aralığında % 0.2 – 2.0'e artan hacimsel oranda, viskozitede % 4 – 15 artış tespit etmişlerdir. Yapılan çeşitli çalışmalarda hacimsel oranın viskozite üzerindeki etkisini gösteren grafikleri Şekil 1.2.'de birleştirilmiştir.



Şekil 1.2. Hacimsel oranın viskozite üzerindeki etkisi [34]

Goharshadi ve Hadadian [35] partikül boyut dağılımının viskozite üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Buna göre, sabit hacimsel oranda tutulduğunda geniş parçacık dağılımlı nanoakışkanlarda sarma yeteneğinin sınırlı partikül dağılımlı nanoakışkanlara göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu da geniş parçacık dağılımının etrafında hareket etmek için daha fazla boş alan sağlar ve sonunda örneği daha az viskoz yapar. Araştırmacılar sıcaklığı, viskozite üzerinde en kritik ve etkili parametre olarak değerlendirmektedirler. Genel olarak, artan sıcaklıkla viskozite de düşüş eğilimi gösterir. Yani sıcaklık arttıkça nanopartikül molekülleri ile temel akışkan arasındaki çekim zayıflar ve dolayısıyla viskozite düşer [36].

Zhao Jia-Fei ve ark. [37] 20 nm' den küçük çaptaki nanopartiküller için, silikondioksit nanoakışkanında viskozitenin pH' a bağlı olduğunu belirtmişlerdir. 5 ve 7 pH değerleri arasında viskozite de dalgalanma olduğunu, pH<5 için ise viskozitede düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu dalgalanmanın topaklanma boyutu ve parçacıkların elektriksel çift

tabakadan kaynaklı olduğunu düşünmektedirler. Viskozite üzerindeki bir diğer etkinin de nanoakışkan hazırlama yöntemi ile ilgili olduğu söylenebilir. Farklı dağıtım teknikleri viskoziteyi etkilemektedir.

Wang ve ark. [38] mekanik karıştırma yöntemiyle hazırladıkları % 5 oranındaki  $Al_2O_3$  (28 nm) – distile su nanoakışkanında etkili viskozitenin % 86'a arttığını gözlemlemişlerdir. Diğer taraftan, Pak ve Cho [39] elektrostatik iteleme ve düzenlenmiş pH yöntemiyle % 10 oranlı  $Al_2O_3$  (13 nm) – su ve  $TiO_2$  (27 nm) – su nanoakışkanlarının ikisinde de suya göre birkaç kat fazla viskozite elde etmişlerdir.

Dağıtıcının viskozite üzerindeki etkisi ile ilgili çok fazla çalışma olmamakla beraber Li ve ark. [40] yapmış oldukları çalışmada manyetik nanoakışkanlarda dağıtıcı konsantrasyonunun viskoziteyi kontrol ettiğini ve artan dağıtıcı konsantrasyonlarının viskoziteyi arttırdığını tespit etmişlerdir.

Yüzey gerilimi, diğer iki fazlı ısı transfer olayı kadar kaynamada önemli bir parametredir. Radiom ve ark.[41] deiyonize su bazlı  $TiO_2$  nanoakışkanlarda, nanopartiküllerin yüzey gerilimi üzerindeki etkisini ve denge temas açısını incelemişlerdir. Nanoakışkanın yüzey geriliminin, zayıf bir şekilde nanopartikül konsantrasyonuna, güçlü bir şekilde dağıtıcı konsantrasyonuna bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Zhu ve ark.[42] çalışmalarında  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanının deneysel sonuçları yüzey geriliminin sıcaklığa bağlı olduğunu göstermektedir. Yüzey gerilimindeki maximum iyileşmenin, 1 g/L konsantrasyonda %5 olduğu belirtilmiştir.

Ayrıca bu parametrelerin yanı sıra zorlanmış taşınım ısı transferi, nanoakışkanların endüstriyel uygulamalarında önemli rol oynar.

Fotukian ve ark. [43]  $CuO$ /su ( hacimsel olarak % 0.24 den az ) türbülans taşınım ısı transfer katsayısı ve basınç kaybı deneysel olarak incelenmiştir. Isı transfer katsayısındaki artma ortalama % 25 ile basınç kaybındaki %20 azalma elde etmişlerdir. Çalışmada, nanopartiküllerin cidara vurup, ısı enerjisini absorbe edip, cidar sıcaklığını düşürerek, geri gelip nanoakışkanla karışmasının ısı performansı arttıracağı düşünülmüştür.

Williams ve ark.[44]  $Al_2O_3$  ve  $ZrO_2$  su bazlı nanoakışkanları yatay boru test bölümünde farklı akış oranlarında (  $9000 < Re < 63000$  ), farklı sıcaklıklarda (21-76 °C), ısı akısı ( $190 \text{ kW/m}^2$ ) ve partikül konsantrasyonunda ( % 0.9-3.6 hacimsel  $Al_2O_3$  ve % 0.2-0.9 hacimsel  $ZrO_2$  için) türbülans taşınım ısı transfer davranışını deneysel olarak incelemişlerdir.

Duangthongsuk ve Wongwises [45] yatay borudan akan  $TiO_2$ /su nanoakışkanının türbülanslı akış rejimindeki sürtünme faktörü ve ısı transfer katsayısını tespit etmişlerdir. Isı transfer katsayısı % 1.0 hacim oranında suya göre % 26 daha fazla, aynı koşullarda % 2.0

hacim oranında temel akışkandan % 14 daha az olduğunu belirtmişlerdir. Basınç düşüşü ise hacimsel oran arttıkça, viskozite de arttığından, artmıştır. Dolayısıyla düşük hacimsel oranlardaki nanoakışkanlarda hafif bir basınç düşüşünün meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Nanoakışkanlarda zorlanmış taşınım ısı transferi ile ilgili yapılan çalışmalar hala yeterli olmamakla birlikte farklı araştırma gruplarının deneysel çalışmaları arasında da uzlaşmaya varılamamıştır. Bazı araştırmacılar nanoakışkanların farklı sistemlerdeki doğal ve zorlanmış taşınım ısı transferi ve akış üzerindeki etkisini incelemişlerdir[46-47]. Yapılan çalışmaların özetini içeren tablo 1.1.'de verilmiştir[48].

Manay [49] tez çalışmasında, metalik partiküllerden oluşturulan su bazlı nanoakışkanların sabit ısı akısı sınır şartlarında mikro kanallarda ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerini araştırmıştır.  $\text{TiO}_2$  metal nanopartiküllerin temel akışkan olarak seçilen de-iyonize su içerisine beş farklı hacimsel oranda ( $\phi=0.0025, 0.005, 0.01, 0.015$  ve  $0.02$ ) katılmasıyla nanoakışkanlar hazırlanmış ve akış hızı ( $U=0.065-1.65$  m/s), hacimsel oran ve kanal yüksekliği ( $H=200 \mu\text{m}, 300 \mu\text{m}, 400 \mu\text{m}$  ve  $500 \mu\text{m}$ ) gibi parametrelerin ısı transferi ve basınç düşümüne etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Laminar akış ve kararlı hal şartlarında, hem saf su hem de su- $\text{TiO}_2$  nanoakışkanı için kanal yüksekliği azaldıkça ısı taşınım katsayısı artmıştır.

Nanoakışkan kullanımının oto radyatörlerin ısı aktarım performansına olan etkisini yapmış olduğu tez çalışmasında inceleyen Kılınç [50], deneyleri farklı akışkan giriş sıcaklıklarında ( $36^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}$  ve  $44^\circ\text{C}$ ) ve farklı debilerde ( $0.6 \text{ m}^3/\text{h}, 0.7 \text{ m}^3/\text{h}, 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$  ve  $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ ) gerçekleştirmiştir. Deneyler için taban akışkanı olarak saf su kullanılarak hacimce % 0.01 ve 0.02 konsantrasyondaki grafen oksit (GO) ve grafen nano ribon (GNR) nanoakışkanları elde edilmiştir. Oto radyatörün etkenlik değerlerinin akışkan konsantrasyonunun artması ile arttığı ve % 0.02 konsantrasyondaki GO ve GNR nanoakışkanlarında saf suya kıyasla analitik değerin üzerine çıktığı sonucu elde edilmiştir. Saf suyla kıyaslandığında % 0.01 grafen oksit nanoakışkanı için en yüksek % 6.9 ve % 0.02 grafen oksit nanoakışkanı için en yüksek % 32.0 toplam ısı transferi katsayısında,  $U$  artış olduğu elde edilmiştir. Grafen nano ribon nanoakışkanı için ise saf suya kıyasla % 0.01 konsantrasyon için en yüksek % 18.9 ve % 0.02 konsantrasyon için en yüksek % 24.8 toplam ısı transferi katsayısı,  $U$  artışı elde edilmiştir.

Bedir [51] sabit ve üniform ısı akılı yatay bir boruda temel akışkanı su olan farklı hacimsel oranlarda oluşturulan iki farklı nanoakışkanın (su- $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve su- $\text{CuO}$ ) zorlanmış türbülanslı akışı ve ısı transfer karakteristikleri sayısal olarak incelemiştir.

**Tablo 1.1.** Nanoakışkanların taşınım ısı transferi ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların özeti

| Yazar                          | Temel akışkan | Partikül               | Partikül boyutu               | Hacimsel oran(%)           | Boyut                                    | Akış rejimi, $Re$               | Sonuç                                                                                  |
|--------------------------------|---------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Pak ve Cho(1998)               | Su            | $g-Al_2O_3$<br>$TiO_2$ | 13nm<br>27nm                  | 1-3<br>1-3                 | 1.066cm çap<br>480cm uzunluk<br>boru     | $Re=104-105$ (türbülans)        | Artan oran ve $Re$ sayısı ile $Nu$ sayısı artmıştır.                                   |
| Eastman ve ark.(1999)          | Su            | $CuO$                  | <100nm                        | 0.9                        | -                                        | türbülans                       | Taşınım ısı transfer katsayısı temel akışkana kıyasla >%15 artmıştır                   |
| Xuan ve Li(2003)               | Su            | $Cu$                   | <100nm                        | 0.3,0.5,0.8,1, 1.2, 1.5, 2 | 10mm çap<br>800cm uzunluk<br>Pirinç boru | $Re=10000-25000$<br>(türbülans) | Artan akış hızı ve oran ile taşınım ısı transfer katsayısı da artmıştır.               |
| Xuan ve Li (2004)              | Su            | $Cu$                   | 26nm                          | 0.5, 1, 1.5, 2             | $D=1.29$ mm hidrolik                     | $Re=200-2000$<br>(laminar)      | %2 oranda $Nu$ sayısında %39 artış sağlanmıştır.                                       |
| Zhou(2004)                     | Aseton        | $Cu$                   | 80-100nm                      | 0.0-4.0g/l                 | 16 mm çap 200 mm uzunluk bakır boru      | -                               | Taşınım ısı transfer katsayısı $Cu$ partikül artışıyla artmıştır.                      |
| Yulong ve ark.(2007)           | Etilen glikol | $TiO_2$<br>CNT         | -                             | -                          | -                                        | -                               | Artan $Re$ sayısı ve oranla taşınım ısı transfer katsayısında artış sağlamıştır.       |
| Williams ve ark. (2008)        | Su            | $ZrO_2$                | 46nm                          | 0.9–3.6<br>0.2-0.9         | 1.27cm çap<br>1.65 mm uzunluk<br>boru    | $9000 < Re < 63000$             | Önemli ölçüde ısı transfer artışı gözlemlenmiştir.                                     |
| Akhavan-Behabadi ve ark (2012) | Yağ           | CNT                    | 5-20<br>2-6nm<br>1-10 $\mu$ m | 0.1,0.2,0.4 %<br>ağırlıkça | Helisel boru                             |                                 | Temel akışkana göre daha yüksek $Nu$ , artan $Re$ sayısı ve oranla artış gözlenmiştir. |
| Sajadi ve Kazemi(2011)         | Su            | $TiO_2$                | 30nm                          | 0.05,0.1,0.15, 0.20, 0.25  | Bakır boru                               | $Re=5000-30000$                 | Artan oranla ısı transferinde artış, yüksek basınç düşüşü                              |

Hesaplamalar, Fluent 6.3 sonlu hacimler programı yardımıyla k-ε türbülans modeli kullanılarak tek faz ve iki faz mixture modelleri ile yapılmıştır. Sayısal çözümde kullanılan nanoakışkanlara ait viskozite ve ısı iletkenlik değerleri deneysel verilerden elde edilmiştir[51]. Her iki nanoakışkan tipinde hacimsel konsantrasyon artışına bağlı olarak ısı transferi katsayısının suya göre arttığı tespit edilmiştir. Nanoakışkanların ısı transfer iyileşmesi hacimsel konsantrasyon ve Reynolds sayısı ile artmıştır. % 4 hacimsel konsantrasyonda CuO içeren nanoakışkanın ısı transfer iyileşmesi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren nanoakışkanından daha fazla olduğu görülmüştür. % 4 hacim oranına sahip CuO nanoakışkanı için Reynolds sayısı 20000’de temel akışkan suya göre ısı transfer katsayısındaki artış yaklaşık % 31 ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanı için % 21’dir. Bu durumun en önemli sebebi CuO nanoakışkanın partikül çapının Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoakışkanına göre daha düşük olduğundan CuO nanoakışkanın ısı transfer yüzeyinin daha büyük olmasıdır.

Buna göre nanoakışkan uygulamalarındaki deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarına göre aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir:

- Uygun koşullar altında örneğin uygun nanopartikül malzemesi ve boyutu, uygun konsantrasyon aralığı, uygun hazırlama metodu ve stabilizeyi arttıran uygun katkı maddeleriyle temel akışkandan daha yüksek ısı transfer katsayısı elde edilir.
- Nanoakışkanların tek fazlı akışkan gibi davranmaları temel akışkana, nanopartikül malzemesi ve boyutuna, konsantrasyonuna bağlıdır. Tek fazlı akışkanlar için zorlanmış taşınım ısı transferinin literatürdeki mevcut bağıntılarının nanoakışkanlara uygulanabilirliği ile ilgili daha fazla deneysel kanıtı ihtiyacı vardır.
- Zorlanmış taşınım akış şartları altında ya laminar ya da türbülanslı akış rejimlerinde, sınır tabaka içindeki kayma gerilmesi ve sıcaklık gradyanı, üniform olmayan ısı iletkenlik ve viskozite dağılımı ile sonuçlanan, sınır tabakanın ısı direncini değiştiren nanopartiküllerin yeniden dağılmasına yol açabilir.
- İki fazlı akış gibi davranan nanoakışkanların, partikül ve temel akışkan arasındaki ısı transfer performansında önemli rol oynayan kayma hızını belirlemek için nanopartiküllerin Brownian hareketleri deneysel veya sayısal simülasyonlar ile tahmin edilmelidir.
- Zorlanmış ısı transfer performansını birçok faktör etkilemektedir. Altı çizilmesi gereken iyileştirme mekanizması sadece daha iyi ısı iletkenlikle ilgili değil aynı zamanda sınır tabakadaki nanopartikül davranışı ile ilgilidir [52].

Nanoakışkanların gelişmiş termal davranışları endüstride büyük önem taşıyan ısıtma, enerji üretimi, mikroüretim, kanser tedavisinde ısı terapi, kimya ve metalurji, ısıtma, soğutma, havalandırma, iklimlendirme gibi bir çok alanda ısı transferinin yoğunlaştırılması için büyük bir yeniliğin temelini oluşturmaktadır[53-56].

Karabulut [57] hazırladığı tezinde grafen oksit-su (GO) nanoakışkanı dört farklı çaptaki boru için de kullanırken, çok tabakalı karbon nanotüp (MWCNT)-su nanoakışkanı ile ilgili deneyler, yalnızca 8 mm iç çapa sahip boruda yapmıştır. Grafen oksit-su ve MWCNT-su nanoakışkanları için kullanılan hacimsel konsantrasyonlar sırasıyla % 0.01, % 0.02 ve % 0.01' dir. Deneylerde, 0.9 l/dak., 1.2 l/dak., 1.5 l/dak. ve 1.8 l/dak. (laminerden türbülansa) olmak üzere dört farklı hacimsel debi ile çalışılmış ve sırasıyla  $D_{ic}=20$  mm ve  $D_{ic}=8$  mm çaplı borular için kullanılan min. ve max. ısı akısı değerleri  $1811.873 \text{ W/m}^2$  -  $7247.492 \text{ W/m}^2$  olmak üzere üç farklı ısı yükü değeri (250 W, 350 W ve 500 W) kullanılmıştır. Deneysel araştırmalar, MWCNT-saf su ve GO-saf su nanoakışkanlarının nanoparçacıklarının dört farklı boru çapı için boru içindeki hareketlerinin ısı transferi ve yük kaybı (basınç düşüşü) üzerindeki etkisini değerlendirmek için yapılmış ve sayısal çalışmada tek fazlı akışkan yaklaşımıyla sonlu hacim yöntemi-ANSYS 15.0-FLUENT üç boyutlu korunum denklemlerini çözmek için kullanılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar, sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Eşmerkezli dairesel bir ısı değiştiriciye bir tanesi düz şerit diğeri bükülmüş şerit olmak üzere iki adet türbülötör yerleştirerek yapmış olduğu tez çalışmasında Geliş [58] , akışkan olarak saf su, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel konsantrasyonda  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su nanoakışkanını kullanmıştır. Elde edilen veriler ışığında % 0,4  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su nanoakışkanı yüzde 14,5 iyileşme sağlarken, % 0,8  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su nanoakışkanı da yüzde 27 iyileşme sağlamıştır. Düz şerit türbülötör ısı transferini % 19 artırırken bükülmüş şerit % 27 artışa sebep olmuştur.

Sucu [59] tez çalışmasında çalışan akışkanı nanoakışkan olan ve farklı açılara sahip eğrisel borularda ısı geçişi ve basınç kayıp karakteristikleri sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada  $Re=4000-100000$  aralığında değişmektedir. Eğrisel boruların açıları ise;  $0^\circ$  (düz boru),  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  ve  $180^\circ$  arasındadır. Elde edilen sonuçlara göre;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -nanoakışkanlarının  $180^\circ$  eğrilik açılı kıvrımlı boruda en iyi ısı performanslarını gösterdikleri belirlenmiştir.

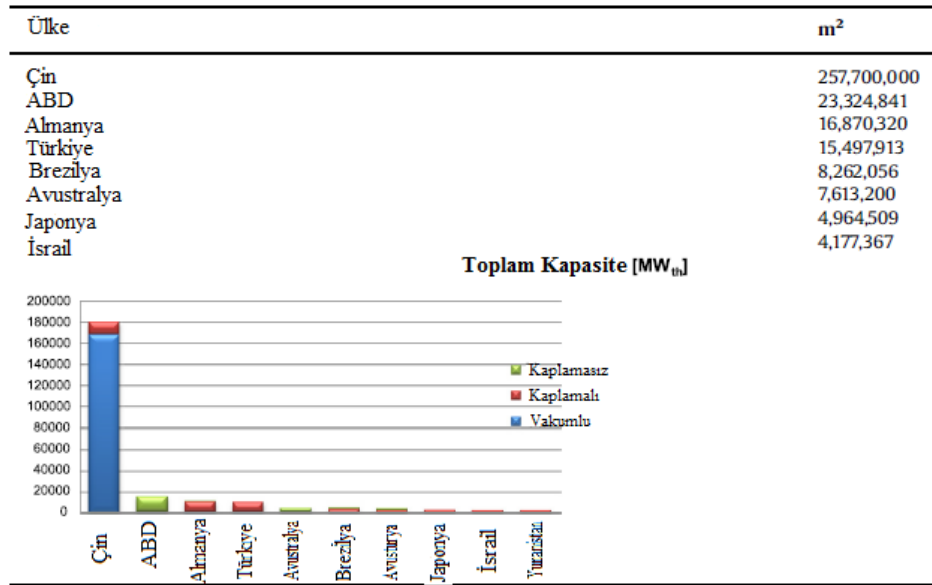
Çiloğlu [60] nanoakışkanlarda havuz kaynama ısı transfer karakteristikleri deneysel olarak incelemiştir.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{CuO}$  nanopartikülleri nanoakışkan hazırlanmasında kullanılmıştır. De-iyonize su esaslı nanoakışkanlar dört farklı hacimsel konsantrasyonda (% 0.001, % 0.01, % 0.05 ve % 0.1) hazırlanmıştır. Bronz malzemeden yapılmış silindirik test

numunesi yüksek sıcaklıklara kadar ısıtıldıktan sonra, atmosfer basıncı altında doymuş şartlardaki nanoakışkan süspansiyonlarına aniden daldırmıştır. Numuneye ait sıcaklık-zaman verileri ile soğuma eğrileri çizilmiş ve kaynama eğrileri elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, nanoakışkanlarda soğutulan test numunesinin soğuma davranışının saf sudakine benzer olduğunu göstermiştir.

Bu alanlardan biri olan güneş enerjili sıcak su hazırlama sistemlerinin verimini arttırmak için birçok yöntem daha önceleri denenmiştir[61-64]. Fakat geleneksel ısı transfer akışkanının yerine nanoakışkan kullanmak yeni bir yaklaşımdır.

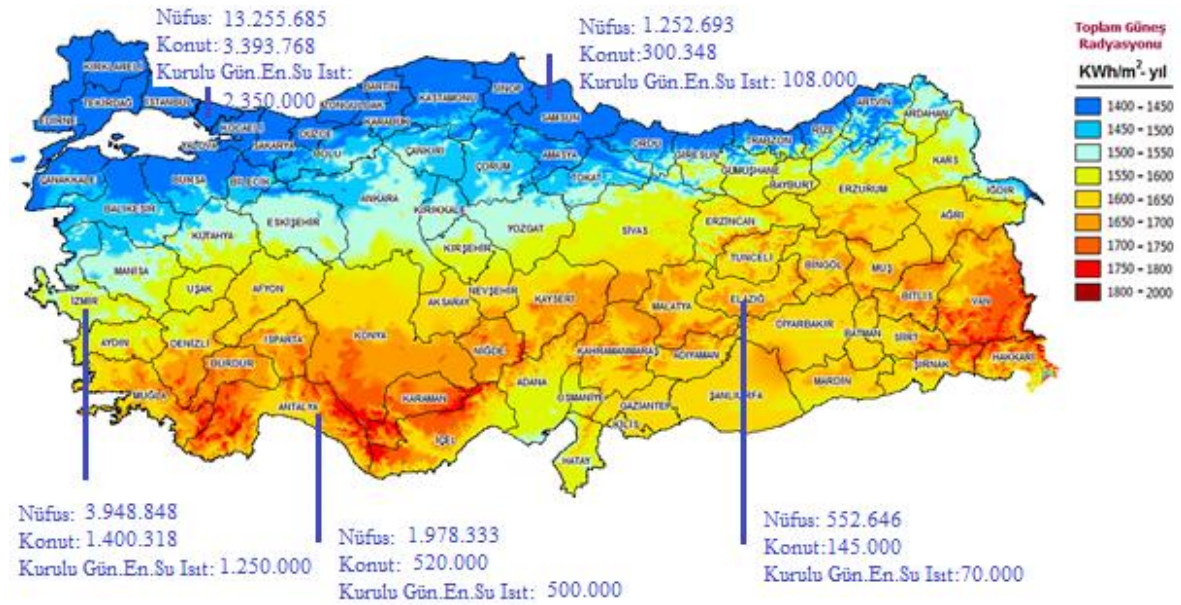
Alternatif enerji kaynakları günümüz teknolojisinde güneş, rüzgar, akarsu, jeotermal, biokütle ve nükleer enerji olarak sıralanabilir. Bunlar içerisinde en çok ısı ve ışık kaynağı olan güneş enerjisinden seraların, binaların, konutların ve kullanma sıcak suyunun ısıtılması amacıyla faydalanılmaktadır. Güneş enerjisi tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyük potansiyele sahip olan enerjidir. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile (hidrojen gazının helyuma dönüşmesi) açığa çıkan ısıma enerjisidir. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, yaklaşık olarak  $1370 \text{ W/m}^2$  değerindedir, ancak yeryüzüne ulaşan miktarı atmosferden dolayı  $0-1100 \text{ W/m}^2$  değerleri arasında değişim gösterir. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiş, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir. [65].

2014 yılı itibari ile Dünya genelinde kurulu bulunan güneş kolektörü alanı 335 milyon  $\text{m}^2$ 'nin üzerindedir. En fazla güneş kolektörü bulunan ülkeler arasında Çin, ABD, Almanya, Türkiye, Avustralya, Brezilya, Avusturya, Japonya, İsrail ve Yunanistan yer almaktadır [66]. Şekil 1.3.' te ülkelere göre toplam kolektör alanı ve toplam kapasite verilmiştir[67].



Şekil 1.3. Ülkelere göre toplam kolektör alanı ve toplam kapasite [67]

Türkiye 16 milyon m<sup>2</sup> kurulu kolektör alanı ile dünyanın önde gelen ülkelerinden biri konumundadır. Şekil 1.4.' te Türkiye Güneş enerjisi potansiyel atlası ve beş il için değerler verilmiştir. Türkiye'nin bulunduğu güneş kuşağı itibarı ile 6105 TWh / yıl güneş enerji potansiyeline sahiptir bu da elektrik üretimi için oldukça yüksek bir miktardır[65-67].



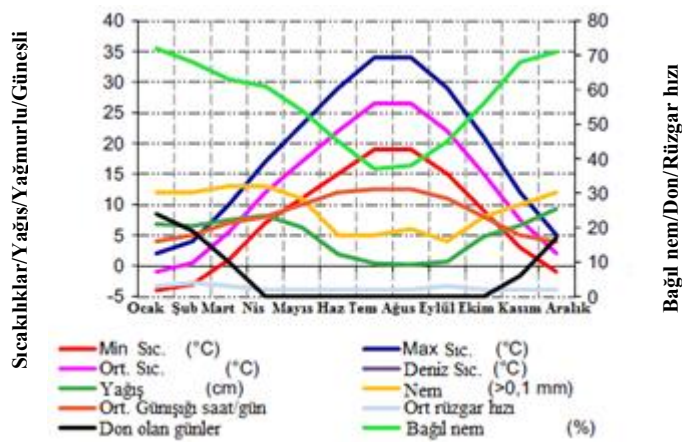
Şekil 1.4. Türkiye Güneş enerjisi potansiyel atlası ve beş il için bazı değerler[65]

Güneş enerjisi teknolojileri yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte fotovoltaik güneş ve ısı güneş teknolojileri olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Fotovoltaik hücreler denilen yarı-iletken malzemeler güneş ışığını doğrudan elektriğe çevirirler. Isıl sistemlerde ise, öncelikle güneş enerjisinden ısı elde edilip bu ısıyı doğrudan kullanılabileceği gibi elektrik üretiminde de kullanılabilir. Isıl sistemlerde; güneş enerjili su ısıtıcıları, güneş ocakları, kurutucu, güneş havuzları, güneş mimarisi, güneş klima, güneş bacaları, güneş enerji santralleri gibi birçok konu araştırmacılar için son yıllarda çalışma konusu olmuştur. Güneş enerjili su ısıtıcılarında kullanılan düzlemsel güneş kollektörleri, güneş enerjisini toplayan ve bir akışkana ısı olarak aktaran çeşitli tür ve biçimlerdeki aygıtlardır. En çok evlerde sıcak su ısıtma amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 1.5. Düzlemsel güneş kollektörleri

Kollektörler, yörenin enlemine bağlı olarak güneşi maksimum alacak şekilde, belli bir açıyla yerleştirilirler. Bu çalışmada deneylerin gerçekleştirileceği deney düzeneğinin kurulu olduğu il olan Elazığ ili için iklim grafiği Şekil 1.6’ da verilmiştir[67].



Şekil 1.6. Elazığ ili için iklim grafiği [67]

Güneş kollektörlü sistemler tabii dolaşım ve pompalı olmak üzere ikiye ayrılır. Bu sistemler evlerin yanında, yüzme havuzları ve sanayi tesisleri için de sıcak su sağlanmasında kullanılır. Bu konudaki Ar-Ge çalışmaları sürmekle birlikte, bu sistemler tamamen ticari ortama girmiş durumdadırlar[65].

Nanoakışkanlar ısı transfer akışkanı olarak birçok mühendislik uygulamasında olduğu gibi güneş enerji sistemlerinde de kullanılmaya başlanmıştır [68]. Güneş enerji sistemlerinin verimini arttırmak için kullanılan güneş pillerinin soğutulmasında da nanoakışkandan yararlanılmıştır.

Elmir ve ark.[69] sonlu elemanlar metoduyla silisyum güneş pillerinin soğutulmasını simule etmişlerdir. Denklemler kartezyen koordinat sisteminde çözülürken analizler  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanı için yapılmıştır. Isıl iletkenlik ve viskozite değerleri sırasıyla Wasp ve Brinkman modelleri kullanılarak tahmin edilmiştir.

Gnanadason ve ark. [70] güneş damıtıcı sistemlerde karbon nanotüp kullanmış ve verimde % 50 artış elde etmişlerdir.

Tyagi ve ark. [71] direkt absorpsiyonlu güneş enerji sistemlerinde alüminyum-su (20 nm) nanoakışkanını kullanarak % 2' den küçük hacimsel oranlarda verimde önemli artış elde etmişlerdir.

Otanicar ve ark.[72] mikro ölçekteki direkt absorpsiyonlu sistemde grafit/su (30 nm), gümüş/su (20 ve 40 nm), karbon nanotüp/su (6– 20 nm çap, 1000–5000 nm uzunluk) kullanarak yapmış oldukları teorik ve deneysel çalışmada % 0.5' ten küçük oranlarda verimde artış, % 0.5' ten büyük oranlarda verimde azalma gözlemlemişlerdir. Gümüş-su nanoakışkanı kullanıldığında azalan partikül boyutu ile verimde % 6 oranında artış gözlemlemişlerdir. Taylor ve ark.[73] deneysel ve teorik çalışmada direkt absorpsiyonlu sistemde grafit/therminol VP-1, alüminyum/ therminol VP-1, gümüş/therminol VP-1, bakır/therminol VP-1 (10–100 nm) nanoakışkanlarıyla %10 verim artışı elde etmişlerdir. % 0.001'den düşük hacimsel oranlarda grafit/therminol VP-1 kullanmak 10–100 MWe güç santralleri için faydalı olduğunu göstermişlerdir.

He ve ark.[74] vakumlu tüp güneş sisteminde  $TiO_2$ /su (5–10 nm), karbon nanotüp/su (10– 50 nm çap, 100–1000 nm uzunluk) kullandıkları deneysel çalışmada karbon nanotüp/su akışkanının daha uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Li ve ark. [75] borulu güneş enerji sistemlerinde  $Al_2O_3$ /su, ZnO/ su, MgO/ su (boyut < 20 nm) ile yaptıkları deneyler sonucunda en uygun sonucu % 0.2 oranlı ZnO/su nanoakışkanında elde etmişlerdir.

Direkt absorpsiyonlu sistemde grafit/su ve grafit/VP1, alüminyum/su ve alüminyum/VP1, bakır/su ve bakır/VP1, gümüş/su ve gümüş/VP1, altın/su ve gümüş/VP1 nanoakışkanları ile deneysel ve teorik olarak çalışan Taylor ve ark.[76] gelen güneş ışığının % 95'in üzerinde nanoakışkan kalınlığı  $\geq 10$  ve  $1.10^{-5}$  hacimsel oran için absorbe edilebileceğini vurgulamışlardır.

Parabolik sistemde teorik olarak çalışma yapan Khullar ve ark.[77] alüminyum/therminol VP-1 (5 nm) nanoakışkanı ile elde ettikleri sonuçlarda klasik sisteme göre %5-10 daha verimli olduğunu görmüşlerdir.

Khullar ve Tyagi [78] alüminyum/su nanoakışkanını direkt absorpsiyonlu sistemde kullanarak 1 yılda  $2.2 \times 10^3$  kg daha az CO<sub>2</sub> emisyonuna yol açtığını belirtmişlerdir. Otanicar ve Golden[79] direkt absorpsiyonda grafit/su ve propilen glikol nanoakışkanlarını kullanıp klasik sistemlere CO<sub>2</sub> emisyonunda azalma elde etmişlerdir.

Sardarabadi ve ark. [80] 11–14 nm boyutlu SiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanı ile fotovoltaik ısı ünitelerinde yaptıkları çalışmada ağırlıkça % 1 ve % 3 oranlı sıvılar için ısı veriminde sırasıyla % 7.6 ve % 12.8 artış elde etmişlerdir.

Risi ve ark. [81] parabolik olukta % 0.3' lük Ni-su sıvısı ile yaptıkları sayısal çalışmada 650°C çıkış sıcaklığında % 62.5 ısı verim elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Filho ve ark. [82] 10–80 nm boyutlu 6.5ppm Ag-su nanoakışkanını direkt absorpsiyonlu sistemde deneysel olarak çalışarak depolanan ısı enerjide %144 iyileşme kaydetmişlerdir.

Liu ve ark.[83] 50 nm boyutlu CuO-su sıvısının kullanıldığı deneylerde açık termosifon entegre edilmiş boşaltılmış tüp şeklindeki güneş kolektörünün performansında iyileşme, verimde % 12.4 artış sağlamışlardır.

Alibakhsh ve ark. [84] parabolik olukta çok duvarlı 10 nm(çap),10 µm(uzunluk) nanotüp-yağ nanoakışkanıyla yaptıkları deneysel çalışmada % 0.2 ve % 0.3 oranlar için verimde %11 iyileşme sağlamışlardır.

He ve ark.[85] vakum tüplü kolektörlerde 5-10 nm TiO<sub>2</sub>-su ve 10- 50nm çap ve 100-1000 nm uzunluktaki karbon nanotüp-su nanoakışkanlarını kıyaslayarak karbon nanotüp-su sıvısının daha uygun olduğu sonucuna varmışlardır. 20 nm den küçük çaplı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO, MgO/su nanoakışkanları ile tüp şeklindeki kolektörlerle Li ve ark tarafından yapılan deneysel çalışmada en iyi sonuç % 0.2 oranla ZnO-su nanoakışkanı ile elde edilmiştir [86].

Düzlemsel kolektörlü güneş enerjili su ısıtma sistemlerinde ısı transfer sıvısı olarak kullanılan geleneksel sıvıların yerine ilk olarak Yousefi ve ark.[87] 15nm boyutlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su ile hazırlanmış % 0.2 ve % 0.4 ağırlık oranındaki nanoakışkanları 1-3 lt/dk ile kullanarak ısı verimi arttırmayı planlamışlardır. Deneysel sonuçlar % 0.2 oranındaki nanoakışkan

kullanıldığında verimde % 28.3' lük iyileşme elde edildiğini göstermiştir. Yüzey aktif madde çözeltisi kullanılması durumunda ısı transfer verimde maksimum %15.63'lük iyileşme sağlanmıştır. Yine aynı araştırmacı ekibin yapmış olduğu bir diğer çalışmada nanoakışkan değiştirilerek çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) - su sıvısı ile 0.0167 - 0.05 kg/s aralığında yaptıkları deneylerde artan oranla birlikte verimde artış tespit etmişlerdir[88]. Bir diğer çalışmalarında da pH' ın verim üzerindeki etkisini inceleyerek ısı absorpsiyonu ve ısı taşıma faktörünün, izoelektrik nokta ve optimum değere göre sırasıyla pH 9.5 ve 6.5' da, arttığını belirtmişlerdir[89].

Tiwari ve ark [90] 45 nm boyutlu  $Al_2O_3$  nanopartiküllerinin su ile % 0.5 - % 2 aralığındaki oranlarda oluşturdukları akışkanı düzlemsel kollektörlü güneş enerji sistemlerinde kullanmışlardır. Deneyler sonucunda %1.5 oranında ısı performansta %31.64 artış elde etmekle birlikte suya kıyasla  $kgCO_2/kWh$  hibrid modda tasarruf sağlandığını göstermiştir. Faizal ve ark.[91] nanoakışkan kullanarak daha küçük ve kompakt düzlemsel kollektörle üretilebileceğini ve bunun geri ödemesinin 2.4 yıl gibi kısa bir sürede gerçekleşebileceğini vurgulamışlardır. Ayrıca bir yılda 1000 kollektörden toplamda 170 kg daha düşük  $CO_2$  emisyon çıktısı ve her bir kollektör için ortalama 220 MJ birikmiş enerji kaydedilebileceğini belirtmişlerdir. Deneylerde, diğer partiküllere kıyasla daha kolay hazırlanabilir olması ve daha ucuz olması sebebiyle kullanılan  $Al_2O_3$  partikülleri dışında CuO, Ag,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ , Ni, karbon nanotüp gibi malzemeler de kullanarak hazırlanan akışkanların güneş enerjili sistemlerde kullanımı ile ilgili sayısal, deneysel ve teorik çalışmalar literatürde mevcuttur.

Moghadam ve ark. [92] 40 nm boyutlu CuO partikülleri ve su ile hazırladıkları sıvıyı düzlemsel güneş kollektöründe deneyerek % 0.4 oranda, 1 kg/dk kütle akış hızında verimde % 21.8 artış elde etmişlerdir. Yine aynı 75 nm boyutlu CuO –su nanoakışkanının kullanıldığı başka bir çalışmada Jee ve ark. [93] ısı verimde % 6.3 artış gözlemlemişlerdir.

Qinbo ve ark. [94] ağırlıkça % 0.1 oranında, 2.33 l/dk akış hızında CuO – su sıvısı ile düzlemsel kollektörde yaptıkları deneysel çalışmada % 23.33 artış sağlamışlardır.

Kabeel ve ark. [95] deniz suyunun tuzdan arındırılması için kullandıkları sistemde CuO-su sıvısından yararlanarak günde 7.7 l /m<sup>2</sup> arındırmayı başarmışlardır.

Chougule ve ark. [96] tarafından yapılan deneysel çalışmada, 10–12 çaplı ve 0.1–10 mikron uzunluktaki çok duvarlı karbon nanotüp ve su ile hazırladıkları sıvıyı kullanarak eğim açısı 31.5° iken ortalama kollektör verimleri sırasıyla su ve nanoakışkan için % 12 ve % 11 artarken 50° iken ortalama kollektör verimleri 7 % ve 4 % artmıştır.

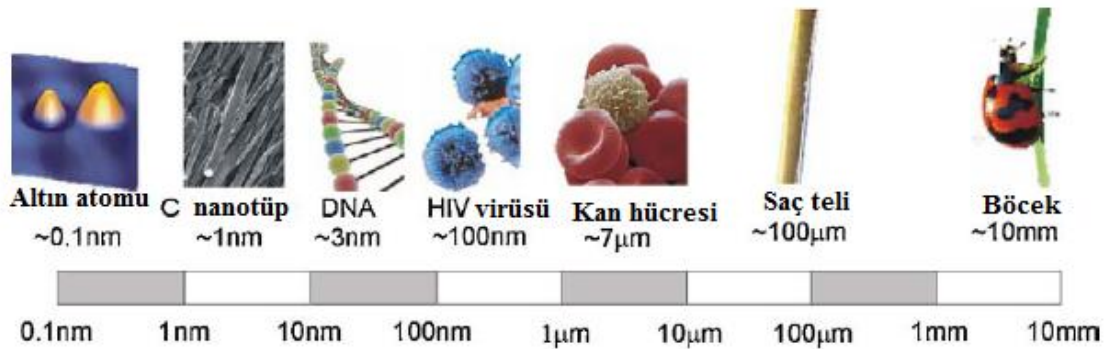
Sarkar [97] sayısal çalışmasında düzlemsel güneş kollektör sisteminde süper kritik CO<sub>2</sub>-su nanoakışkanını kullanıp suyla kıyasladığında optimum % 18 verim artışı sağladığını bildirmiştir. Çıkış sıcaklığı da 50-60°C ölçülmüştür.

Tek duvarlı karbon nanotüp-su içeren düzlemsel kollektörlü güneş enerji sistemi için sayısal çalışma yaparak deneysel ve matematiksel tahminler elde etmeye çalışan Said ve ark.[98] entropi üretiminde % 4.34 düşüş, ısı transfer katsayısında % 15.33 artış sonucuna varmışlardır.

Colangelo ve ark. [99] nanopartikül çökme problemini önleyen tasarımda yeni bir düzlemsel kollektör prototipi ile gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada % 1, % 2 ve % 3 hacimsel oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanını kullanmışlardır. Elde ettikleri % 3' lük karışımın ısıl iletkenliğinde % 6.7 artış, taşınım ısı transfer katsayısında da aynı hacimsel oranda % 25 artış elde etmişlerdir. Kollektörde yapmış oldukları yapısal değişikliğin (akış ortamına konik çubuk eklenmesi) basınç düşüşüne etkisinin artan akış hızına oranla ihmal edilebilir seviyede olduğunu belirtmişlerdir.

### 1.1. Nanoakışkanlar

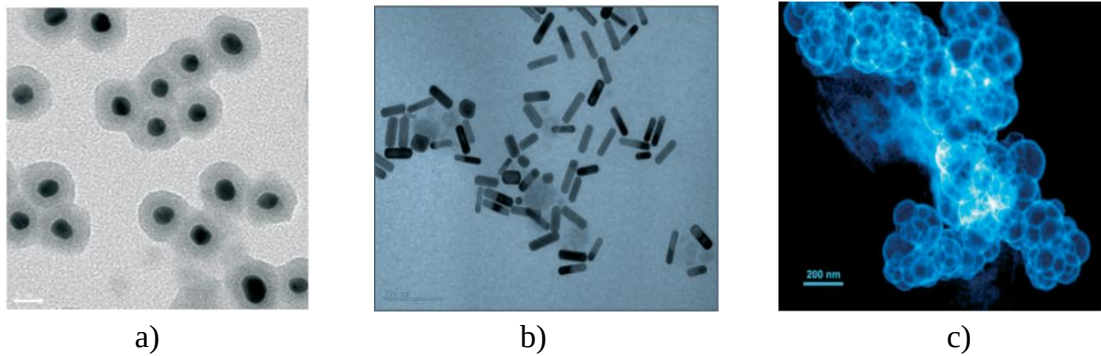
Son yıllarda malzeme bilimindeki gelişmeler sonucunda ısı transferinin iyileştirilmesinde yüz yıllardır uygulanan akışkan içerisine milimetre veya mikrometre boyutlarındaki katı partiküllerin süspanse edilmesi yöntemi yeni bir boyut kazanmıştır. Maddeyi atomik ve moleküler seviyede kontrol etme bilimi olan nanoteknoloji, son yıllarda Amerika, Çin, Avrupa ve Japonya'da yapılan araştırmalarla, 21.yüzyılda yeni ve umut verici bir teknoloji olacağını göstermiştir. Nanometrenin boyut olarak açıkça anlaşılması için Şekil 1.7.' de milimetre ve mikrometre ile kıyaslamalı olarak bazı örnekler verilmiştir[56].



Şekil 1.7. Uzunluk ölçeği ve ilgili bazı örnekler[56]

Boyutları 100 nm ve altında kalan tozlar olarak tanımlanan nanopartiküller ise nanoboyutlu malzemelerin dolayısıyla nanoteknolojinin temelini oluşturmaktadır. Bu partiküller diğer ticari malzemelerden genelde farklı ve üstün kabul edilen özellikler göstermektedir. Nanopartikül özelliklerinin çekiciliğinin günümüzde bilinen nedenleri; kuantum boyut etkileri, elektronik yapısının boyut bağımlılığı, yüzey atomlarının benzersiz karakterleri ve yüksek yüzey/hacim oranı olarak ön plana çıkmaktadır. Nanopartikül sentezi bu yapıların sergiledikleri üstün özellikler sebebiyle yüksek aktiviteli katalizörler, optik uygulamalar için özel teknolojik malzemeler ile birlikte süper iletkenler, aşınmaya karşı katkılar, yüzey aktif maddeler, ilaç taşıyıcılar ve özel teşhis aletleri gibi birçok teknolojik ve farmakolojik ürünlerin hazırlanmasının yolunu açmıştır. Bunların yanı sıra, malzemelerin nanoboyut seviyesinde kontrolü nanotaşıyıcılar, sensörler, nanomakinalar ve yüksek yoğunluklu veri depolama hücreleri gibi kendine özgü işlevselliğe sahip minyatürleştirilmiş aygıtların gerçekleştirilmesine izin vermektedir[100]. Nanoteknolojik malzemelerin çıkış noktasını oluşturan nanopartiküller geniş bir kimyasal aralık ve morfolojide üretilebilirler. Nanoyapılı malzemelerin üretimi için iki temel yaklaşım bulunmaktadır:

- *Yukarıdan aşağıya doğru üretim:* Başlangıçta büyük olan hacimsel malzemeye dışarıdan mekaniksel veya kimyasal işlemler ile enerji verilmesi sonucunda malzemenin nano boyuta kadar inebilecek küçük parçalara ayrılması esas alınmaktadır. Bu yaklaşım ile çalışan yöntemlere verilebilecek en genel örnekler; mekanik öğütme ve aşındırmadır. Örneğin, mikron boyuttaki tozun yüksek enerjili değirmenlerde (ör. Spex değirmeni) öğütülerek ortalama partikül boyutları 100 nm'nin altında olan tozlar üretilir.

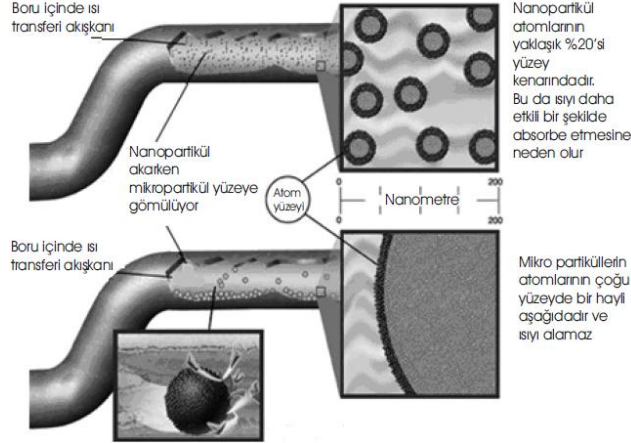


**Şekil 1.8.** Nanopartiküllere ait elektron mikroskobu görüntüleri a) altın çekirdek-silika kabuk nanopartiküller b) altın nanoçubuklar c) iç boşluklu platin nanopartiküller

- *Aşağıdan yukarıya doğru üretim:* Atomik veya moleküler boyuttaki yapıları kimyasal reaksiyonlar ile büyütülerek partikül oluşumunun gerçekleştirilmesine dayanmaktadır. Metan gazının parçalanması sonucu karbon nanotüp üretimi örnek olarak verilebilir. Nanokristalin metal ve alaşımlarının üretiminde kullanılan ilk yöntem olan gaz yoğunlaştırma tekniği aşağıdan yukarıya yaklaşımıyla çalışmaktadır. Kimyasal buhar kaplama, kimyasal buhar yoğunlaştırma, sol jel ve sprej piroliz yöntemleri de bu yaklaşımın en çok bilinen diğer örnekleridir [2].

Bu yöntemlerle 100 nm' nin altında parçacık elde edilerek bu parçacıklar, geleneksel olarak endüstriyel sistemlerde ısı transfer akışkanı olarak kullanılan su, sentetik yağ (motor yağı), etilen glikol gibi temel akışkanlarla belirli hacimsel oranlarda karıştırılarak yeni akışkanlar elde edilmiştir. İlk kez Choi ve arkadaşları [3] tarafından Argonne Ulusal Laboratuvarı, ABD'de yapılan çalışmalar sonucunda tanımlanmıştır. Bu çalışmada nanoakışkanlar; *“nano boyutta metalik parçacıkların, su, etilen glikol (EG) veya motor yağı (EO) gibi endüstriyel ısı transferi akışkanları içerisinde dağıtılmasıyla oluşturulmuş, yaklaşık 10 nm büyüklüğünde metalik parçacıklar içeren ve günümüzde kullanılan nano boyut teknolojisi ile üretilebilecek, yüksek ısı iletkenliğine sahip yeni tür akışkanlar”* olarak tanımlanmıştır. Yeni bir akışkan sınıfı olan nanoakışkanlar, nano boyutlu partiküllerin (1-100 nm) temel akışkan ile oluşturdukları süspansiyonlardır. Nanoakışkan üretebilmek için yaygın olarak kullanılan nanopartiküller SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub>, CuO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZnO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>... gibi seramikler; Ag, Au, Cu, Fe ve Ni gibi saf metaller; karbon ve titanat(TNT) nanotüpler ( tek ve çok duvarlı ), elmas ve grafit gibi karbon esaslılar; Ag-Cu, Ag-Al ve Al-Cu gibi alaşımlardır. Yaygın olarak kullanılan temel akışkanlar ise; su (H<sub>2</sub>O), etilen glikol (EG), propilen glikol (PG) ve bunların karışımı (H<sub>2</sub>O&EG, H<sub>2</sub>O&EG, EG&PG) ve motor yağı olarak sıralanabilir. Bunlara ek olarak, dekan(C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>), polialfaolefin (PAO) ve vites yağı örnek verilebilir. Bu partiküller, genel olarak metal ve metal oksitler olarak, dışarı daha fazla ısı transferi sağlayarak iletim ve taşınım katsayısını artırırlar. Bunun nedenlerinden biri; akışkan içerisine süspanse edilen partiküllerin, akışkanın ısı kapasitesini arttırmasıdır. Partiküller arasındaki etkileşim ve çarpışmalar akış geçiş yüzeyinin, çalkantı ve türbülans şiddetinin artmasına neden olur. Daha yüksek ısı iletimiyle birlikte çalkantı şiddeti ve geniş yüzey alanı daha çok ısı transferine izin verir. 20 nm' den küçük partiküller atomlarının % 20'sini yüzeylerine taşırlar, bu da onları ısı etkileşim için hazır hale getirir. Diğer bir avantaj ise çok küçük boyutlarından dolayı sıvıda mikro taşınımı ortaya çıkaran ve bundan dolayı ısı transferini artıran partikül hareketliliğidir[101]. Nanoakışkanlar, mikrometre ya da milimetre

boyutlu partiküller içeren sıvılarla karşılaştırıldığında daha iyi süspansiyon kararlılığına sahiptirler. Şekil 1.9.’ da nanopartiküllerin mikropartiküllerle karşılaştırılması gösterilmektedir. Milimetre ve mikrometre boyutunda partikül içeren süspansiyonların en büyük problemi hem bu partiküllerin hızla çökmesi hem de mikro sistemler için bu partiküllerin büyük olmasıdır [102].

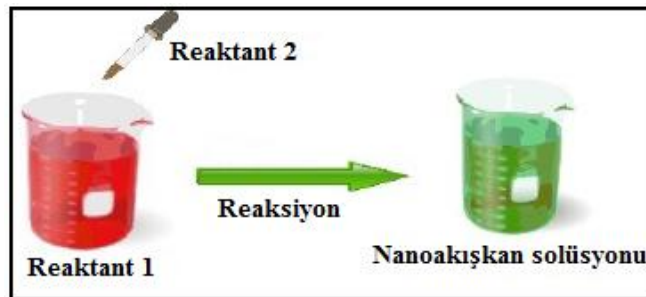


Şekil 1.9. Nanopartiküllerin mikropartiküllerle karşılaştırılması [102]

## 1.2. Nanoakışkanların Hazırlanması

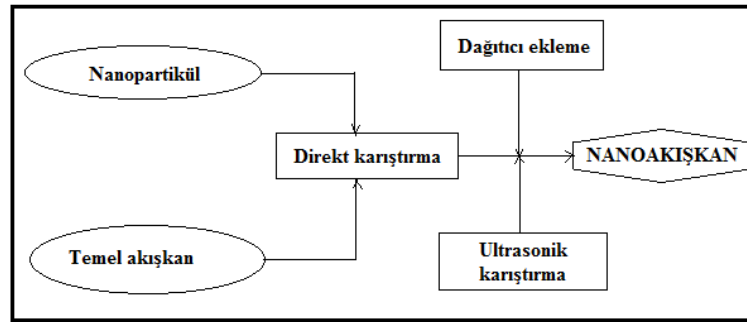
Basit bir katı-sıvı süspansiyonu olmayan, kararlı (stabil) ve dayanıklı bir süspansiyon olan, partiküllerdeki topaklanma ihmal edilebilir düzeyde olan, akışkanın kimyasal özelliklerinin değişmediği nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan iki yöntem mevcuttur.

- *Tek adım yöntemi:* Nanopartiküller direkt fiziksel buhar biriktirme tekniğiyle veya sıvı kimyasal yöntem ile üretilir. Şekil 1.10.’ da tek adım yöntemiyle nanoakışkan hazırlanması verilmiştir[103]. Bu yöntemle, nanopartikülün kurutulması, depolanması, taşınması ve dağılması önlendiği için nanopartikülün topaklanması engellenmiş ve daha stabil bir nanoakışkan hazırlanmış olunur. Bu yöntemin dezavantajı, sadece düşük basınçlı akışkanlar için uygun olmasıdır.



Şekil 1.10. Tek adım yöntemiyle nanoakışkan hazırlanması[103]

- *İki adım yöntemi:* Nanoakışkanların hazırlanmasında en yaygın olarak başvuru olan yöntem iki adım yöntemidir. Bu yöntem, nanopartiküller temin edilerek direkt olarak temel sıvıların içine katılarak dağıtma işlemine tabi tutulan nanoakışkan süspansiyonunun hazırlanması işlemidir. Nanopartiküller direkt olarak temel sıvı içine katıldığında topaklanma meydana gelebilir. Şekil 1.11.'de iki adım yöntemiyle nanoakışkan hazırlanması şematize edilmiştir. İki adım metodu, metalik nanopartiküllerde daha az olmakla birlikte, metalik olmayan ve oksit nanopartiküllerde daha başarılı sonuçlar vermektedir. Ultrasonik karıştırma ile dağıtıcı veya yüzey aktifleştirici madde eklenmesi, nanopartiküllerin topaklanmasını minimize ederken, dağılım özelliğini de artırır.



Şekil 1.11. İki adım yöntemiyle nanoakışkan hazırlanması

### 1.3. Nanoakışkanların Kararlılığı

Nanopartiküllerin çok güçlü Wan der Waals etkileşiminden dolayı solüsyonda topaklanmasını ve çökmesini engellemek için aşağıdaki yöntemler uygulanmaktadır;

- Süspansiyonun pH değerini değiştirmek
- Yüzey aktif madde çözeltilerinin kullanımı (aktivatörler ve seyrelticiler)
- Ultrasonik titreşim

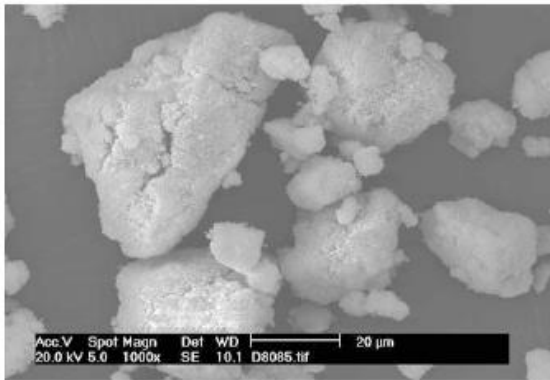
Uygulamada kullanılan aktivatörler ve seyrelticiler tioller, oleik asit ve laurate tuzlarıdır [4]. Yüzey aktif madde çözeltileri ve ultrasonik titreşimi beraber veya ayrı ayrı uygulamak mevcut literatürde araştırmacıların çoğunun tercih ettiği en yaygın kullanılan yöntemdir.

1. *pH değerini kontrol ederek yüzey yükünü kontrol etmek:* Nanoakışkanın stabilitesi direkt olarak elektrokinetik özelliğiyle ilgilidir. Yüksek yüzey yükü yoğunluğu

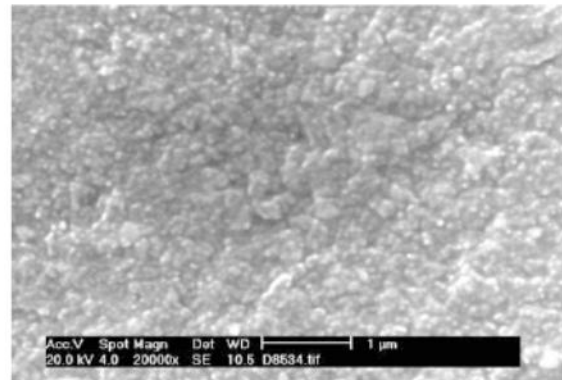
sayesinde, güçlü itici güçler iyi dağılmış süspansiyonu stabilize edebilir. Süspansiyonun pH değerinin izoelektrik noktadan uzak durmalıdır. İzoelektrik nokta zeta potansiyeli sıfır olan potansiyel kontrol iyonlarının konsantrasyonudur. Bu nedenle izoelektrik noktada yüzey yükü sıfırdır.

2. *Bazı yüzey aktif madde çözeltileri ekleyerek yüzeyi değiştirmek:* En çok kullanılan yöntemlerdendir. Yüzey aktif maddeler partikül süspansiyon ortamı ara yüzeyini değiştirip uzun zaman topaklanmayı engelleyebilir. Uygun yüzey aktif veya dağıtıcı seçimi solüsyonun ve partikülün özelliğine bağlıdır. Nanopartikülün yüzeyinde absorbe edilen yüzey aktif madde moleküllerin yüzey enerjisini düşürür ve bu da yüzeyin topaklanmasını engeller. Sodyum Dodesil Sülfat (SDS), Sodyum Dodesil Benzen Sülfanat (SDBS), Setil Trimetil Amonyum Bromit (CTAB) en yaygın kullanılan yüzey aktif maddelerdir. Yüzey aktif maddelerin katılması nanoakışkanların yüksek sıcaklıklarda çalışılmasını sınırlar. Nanopartikül ile yüzey aktif madde arasındaki bağ zarar gördüğü zaman nanoakışkan stabilitesini kaybeder ve nanopartiküller çöker.
3. *Ultrasonik Titreşim Kullanmak:* Ultrasonik banyolar, işlemciler ve homojenizatörler diğer metotlarla kıyaslandığında, topaklanmayı engellemek için en etkili yöntemlerdendir[104].

Bütün bu teknikler, kararlı bir süspansiyon elde etmek için partiküllerin kümelenmesini ortadan kaldırmayı ve asılı partiküllerin yüzey özelliklerini değiştirmeyi amaçlamaktadır. Şekil 1.12.' de CuO partiküllerinin TEM'de (Transmission Electron Microscope) çekilmiş görüntüleri verilmiştir[105].



a)



b)

**Şekil 1.12.** a) Topaklanmış, b) homojene yakın dağılmış CuO partikülleri [105]

Nanoakışkanların stabilitesini belirlemek için çeşitli yöntemler vardır[35]:

1. Zeta potansiyeli ölçmek nanoakışkanların stabilitesini belirlemek için kullanılan geçerli yöntemlerden birisidir. Mutlak zeta potansiyeli yüksek olursa partiküller arası itme o kadar güçlü olur. Bu nedenle kolloid üzerinde Wan der Walls kuvvetlerinin etkisi daha düşüktür.
2. Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) veya ışık saçılım yöntemi ile partikül boyut dağılımı ölçülerek nanoakışkanların stabilitesi belirlenir. Değerlendirme yapıldıktan sonra eğer nanopartiküller dar parçacık boyut dağılımına sahipse, nanoakışkanın stabil olduğu söylenebilir.
3. UV-Vis spektrofotometresi ölçümü ile yapılan analizler de nanoakışkanların stabilitesini değerlendirmek için kullanılan yöntemlerdendir. Nanoakışkan emiliminin ölçümüyle, çökme zamanıyla nanoakışkan yüzeyindeki partikül konsantrasyonunun değişkenliği belirlenebilir. Çünkü yüzeydeki nanopartikül konsantrasyonu ile partiküllerin emilimi arasında lineer bir ilişki vardır. Fakat bu dağılımlar, çökmeyi gözle görebilmek için çok karanlık olduğundan, bu yöntem yüksek konsantrasyonlu nanoakışkanlar için uygun değildir.
4. Kriyojenik (kriyotaramalı) elektron mikroskobu (Cryo-TEM) da başka etkin bir yöntemdir. Eğer kriyasyon boyunca nanoakışkanın mikroyapısı değişmiyorsa şekil, boyut, dağılım ve nanopartikül topaklanması bu yöntemle ayırt edilebilmektedir.

#### 1.4. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Nanoakışkanların ısı özellikleri, performansını etkileyen başlıca özelliklerdendir. Bunlar ısı iletkenlik, özgül ısı, yoğunluk, viskozite ve ısı transfer katsayısıdır.

##### 1.4.1. Isıl İletkenlik

Akışkanın ısı transferi performansını arttırmada ısı iletkenlik önemli bir parametredir. Farklı katı ve sıvıların ısı iletkenlikleri Tablo 1.2. 'de verilmiştir [46]. Metal ve metal oksitleriyle kıyaslandığında, karbon nano tüplerin daha yüksek ısı iletkenlikleri vardır. Nanoakışkanların ısı iletimi artışını açıklayan potansiyel mekanizmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir[35]:

- *Nanopartiküllerin Hareketi:* Nanoakışkanlardaki partiküllerin çarpışmalarından, partikül-partikül temasından kaynaklanan enerji değişimi ısı iletkenlik artışına neden olabilir. Böyle hareketler nanopartiküllerin hareketinden doğar. Çarpışmalar olmazsa bile partiküllerin Brownian hareketi ısı iletkenliği artırabilir. Brownian hareketi nedeniyle partiküllerin hareketi nanoakışkana önemli miktarda ısı taşıyabilmek için oldukça yavaştır.

Brownian hareketi direkt olarak ısı iletkenlikte artışa neden olmaz. Fakat partikül kümelenmesini oluşturarak ısı iletkenlikte artışa neden olan bir rolü vardır.

- *Katı-Sıvı Arayüzeyinde ki Katman:* Akışkan moleküller katı yüzeyinde düzenli yapılar oluştururlar. Bu arayüzey tabaka, katı partikül ve sıvıdan oluşan karışımdan farklı termofiziksel özellik gösterir. Çünkü nano tabakanın düzenli yapısının ısı iletkenliğinin, akışkanınkinden daha yüksek olması beklenir. Arayüzey tabakanın varlığı ısı taşıma da önemli rol oynamasına rağmen, ısı iletkenlik artışından tek başına sorumlu olması muhtemel değildir.
- *Nanopartiküllerin Isı Taşıma Yapısı:* Makroskobik teoriler ısı'nın difüzyonla taşındığını varsaymaktadır. Kristal halindeki katılarda ısı fononlarıyla taşınır. Bir nanoakışkan içerisinde nanopartiküllerin boyutu, fononların ortalama serbest yolundan daha kısa olduğu zaman fononlar nanopartikül karşısında daha fazla difüze olmaz sadece saçılmadan balistik hareket eder. Balistik ısı transferi detayına girmeden, balistik fononların taşınmasının, çok hızlı difüzyon fonon taşımadan nasıl daha etkili olacağını göz önüne getirebilmek zordur.
- *Yüzeyin Yük Durumu:* Nanoakışkanın pH değerinin, ısı iletkenliğin performansı üzerinde güçlü bir etkisinin olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle yüzeyin yük durumu da nanoakışkanların ısı iletkenlik değerinde artışa neden olabilir.

**Tablo 1.2.** Farklı katı ve sıvıların ısı iletkenlikleri

| Katı / Sıvı             | Malzeme                      | Isıl İletkenlik<br>(W/m °K) |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Metalik Katılar         | Gümüş                        | 429                         |
|                         | Bakır                        | 401                         |
|                         | Alüminyum                    | 237                         |
| Metalik Olmayan Katılar | Elmas                        | 3300                        |
|                         | Karbon nanotüpler            | 3000                        |
|                         | Silisyum                     | 148                         |
|                         | Alüminyum oksit( $Al_2O_3$ ) | 40                          |
| Metalik Sıvılar         | Sodyum (644°K'de)            | 72.3                        |
| Metalik Olmayan Sıvılar | Su                           | 0.613                       |
|                         | Etilen glikol (EG)           | 0.253                       |
|                         | Motor yağı (MY)              | 0.145                       |

- *Nanopartikül Kümelenmesinin Etkisi:* Eğer partiküller kümelenirse, daha düşük ısı dirençli bir yol oluşturur. Bu yüzden ısıl iletkenlik üzerinde önemli etkisi vardır. Buna rağmen kümelenme genişlerse katı topaklanmaların geniş mesafelere uzanması muhtemeldir. Böyle geniş kümelenmeler akışkanda çökelmelere neden olur. Ayrıca parçacıklar aralarında fiziksel temas içinde olması gerekmiyorsa fakat sadece hızlı ısı akısına izin vermek için yeterince yakınsa ısıl iletkenlikte başka bir artış gerçekleşebilir. Buna rağmen kümelenmeler ısı transferinde negatif etki oluşturabilir. Özellikle düşük hacimsel oranda, akışkanın dışına partiküller çökerek yüksek ısıl dirençli geniş partikül-sıvı bölgesi oluştururlar.

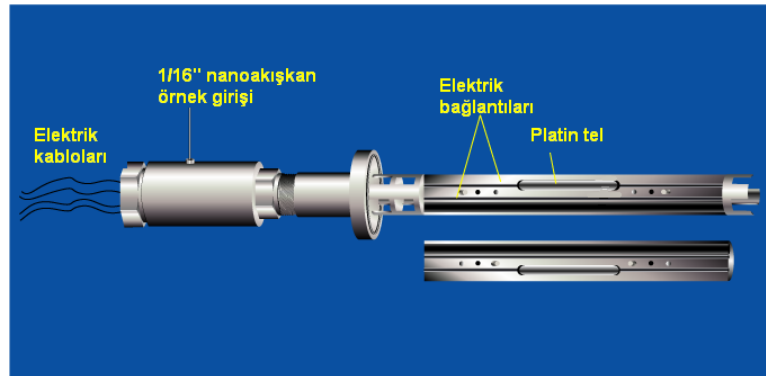
#### 1.4.1.1. Isıl İletkenlik Ölçüm Yöntemleri

Nanoakışkanların ısıl iletkenliğini ölçmek için;

- Geçici sıcak tel metodu,
- Kararlı hal paralel plaka tekniği (Lee Disk Yöntemi),
- Sıcaklık salınım tekniği (Searle Yöntemi) kullanılmaktadır [106].

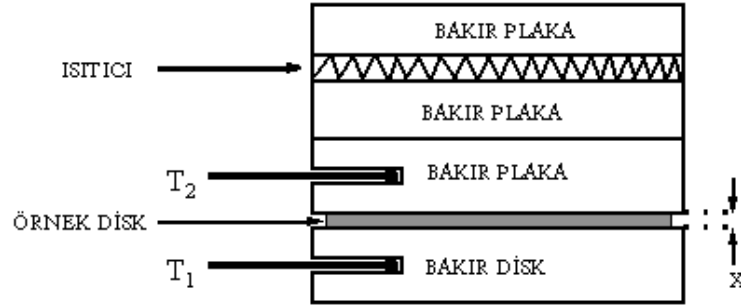
Akışkanların ve nanoakışkanların ısıl iletkenlik katsayı ölçümlerinde geçici sıcak tel yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır.

*Geçici sıcak tel metodu*, ani elektriksel sinyallerle telin zaman ve sıcaklık tepkisini ölçerek çalışır. Tel hem ısıtıcı hem de termometre olarak kullanılır. Fourier yasası ve sıcaklık verileri ısıl iletkenliği hesaplamak için kullanılır. Şekil 1.13' te görüldüğü gibi geçici sıcak tel yönteminde genellikle çapı mikro boyutlarda olan platin tel kullanılır[106]. Yöntemde temel olarak telin, radyal doğrultuda sonsuz olarak öngörülen çok uzun bir silindirik örneğin eksenine yerleştirildiği varsayılır. Başlangıçta izotermal örneğe, ısıtıcı tel tarafından üretilen joule ısı ile ısı enerjisi verilmektedir. Tel ihmal edilebilir çapta ve sonsuz uzunlukta olduğu koşulda, ısı aktarımı radyal doğrultudadır.



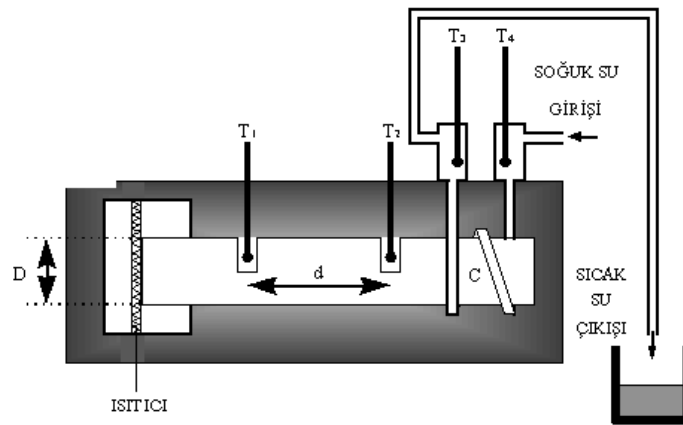
Şekil 1.13. Geçici sıcak tel yöntemi deney düzeneği [106]

*Kararlı hal paralel plaka tekniği (Lee Disk Yöntemi);* ısı iletkenliği kötü olan malzemelerin ısı iletkenliklerinin ölçümünde kullanılan bir tekniktir. Şekil 1.14’ de Lee Disk yönteminin şematik bir şekli verilmiştir[106]. Bu yöntemde örnek disk şeklindedir ve  $x$  kalınlığındaki örnek disk, bakır disk ile plaka arasına yerleştirilir. Bakır disk ile plakanın sıcaklıkları ısı iletkenlikleri yardımı ile ölçülür. Örneği ısıtmak için bakır plakaya ısıtıcı tel yerleştirilir. Örnek belli bir  $T_2$  sıcaklığına kadar ısıtılır.  $T_2$  ve  $T_1$  sıcaklıkları ölçülür.



Şekil 1.14. Lee Disk yönteminin şematik gösterimi [106]

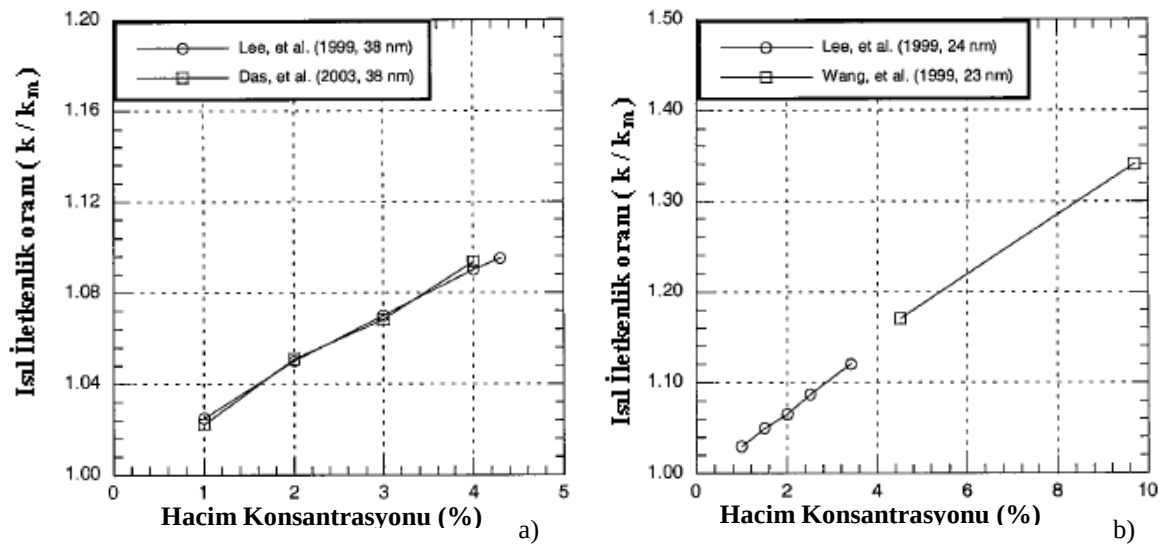
*Sıcaklık salınım tekniği (Searle yöntemi);* ısı iletim katsayısı yüksek olan malzemelerin ısı iletkenliklerinin ölçümünde kullanılan bir yöntemdir. Bir malzemenin sıcaklığa bağlı fiziksel özellikleri incelenirken ısı yalıtımı önem kazanır. Bu nedenle ısı iletimi ölçümlerinde örneğin ısı iletkenliği olarak çevreden yalıtılması gerekir. Searle yönteminde, malzeme adyabatik bir ortama yerleştirilir. Malzeme bir ısıtıcı kullanılarak bir ucundan ısıtılır. Bu yöntemde Şekil 1.15’ te görüldüğü gibi iki adet ısı iletkenliği ile belirli bir  $d$  mesafesinde yerleştirilir ve bu yöntemde sıcaklık gradientini belirlemek için  $T_1$  ve  $T_2$  ölçümleri alınır[106].



Şekil 1.15. Searle yönteminin şematik gösterimi [106]

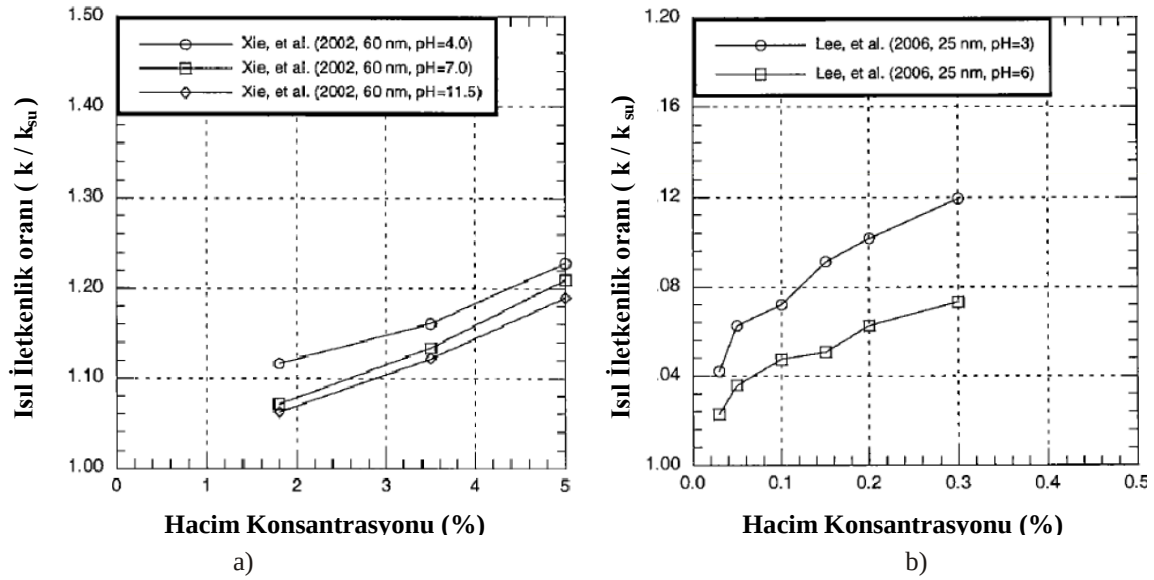
#### 1.4.1.2. Isıl İletkenliği Etkileyen Faktörler

Nanopartikül ve akışkan karışımından oluşan nanoakışkanın ısı iletkenlik üzerinde çeşitli faktörlerin etkisi vardır. Nanoakışkanın ısı iletkenliği nanoakışkanın viskozitesine, temel akışkanın ısı iletkenliğine, katı partikülün özelliklerine (yoğunluğu, gizli ısı gibi) ve nanopartikülün hacimsel oranına bağlıdır. Nanoakışkanın ısı iletkenliği nanopartikül kümesinin dönme yarıçapıyla ve topaklanmanın oransal yapısıyla değişir. Akışkan içerisine süspansiyon edilmiş kümelerin dönme yarıçapı ne kadar küçükse nanoakışkanların ısı iletkenliği o kadar büyük olur. Çünkü daha küçük kümeler birim zamanda daha hızlı ve daha uzağa hareket ederler ve nanoakışkan içerisinde daha güçlü enerji taşınımına neden olurlar[6]. Nanoakışkanların ısı iletkenliğini etkileyen diğer parametreler; hacimsel oran, partikül malzemesi, temel akışkan, sıcaklık, topaklanma ve pH değeridir. Ayrıca nanoakışkanın ısı iletkenliği, karıştırılmış partiküllerin boyutlarına ve şekillerine de bağlıdır. Şekil 1.16' da iki farklı çalışma grubunun aynı parametrelerle yaptıkları çalışmada  $Al_2O_3$ -su ve  $CuO$ -su nanoakışkanlarının hacim konsantrasyonunun ısı iletkenlik artış oranına etkisi verilmiştir [19]. Grafiklerden anlaşılacağı üzere sonuçlar hemen hemen özdeş olup, hacimsel oran arttıkça ısı iletkenlik oranı da artmaktadır. Oksit partiküllü hacimsel oranlar, orta viskozite artışını korumak için, normalde % 4-5'in altında ve ısı iletkenlikteki artış ortalama 1.3 ( %30 ) civarındadır. Diğer parametrelerle kıyaslandığında nanoakışkanların ısı iletkenliği üzerinde pH değerinin etkisini inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. pH değeri izoelektrik noktaya ulaşıncaya kadar ısı iletkenlik artar. İzoelektrik noktada ise ısı iletkenlik maksimum değerine ulaşır, daha fazla pH değerindeki artışla ısı iletkenlik düşer.



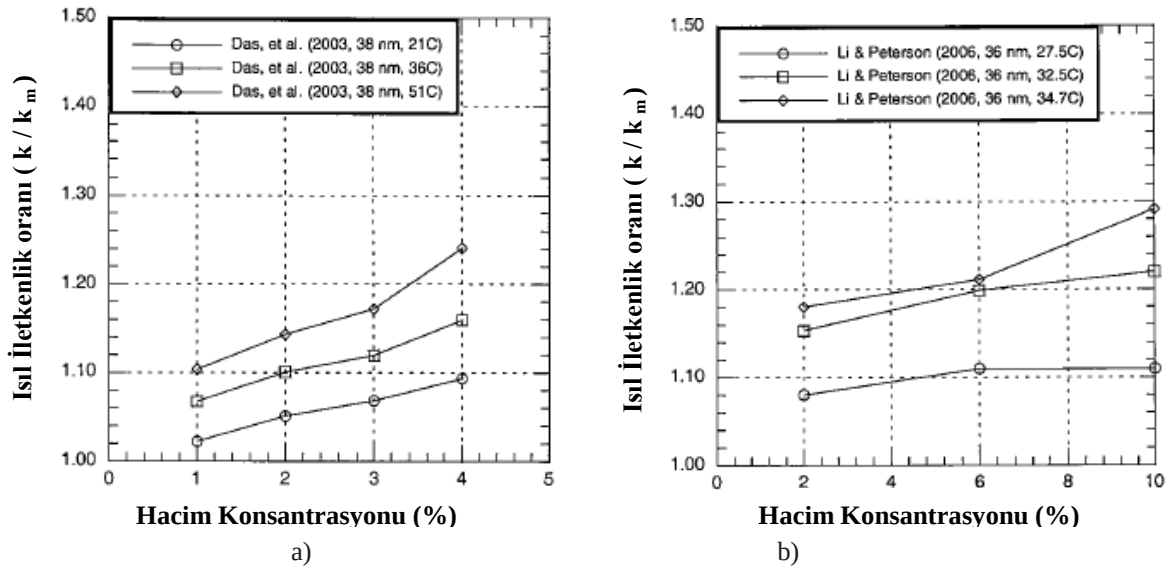
Şekil 1.16. a)  $Al_2O_3$ -su b)  $CuO$ - su nanoakışkanlarının hacim konsantrasyonunun ısı iletkenlik artış oranına etkisi[19]

Şekil 1.17' de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su ve  $\text{CuO}$ -su nanoakışkanlarının nanoakışkanının pH değerlerinin ısı iletkenlik artış oranına etkisi verilmiştir [19].



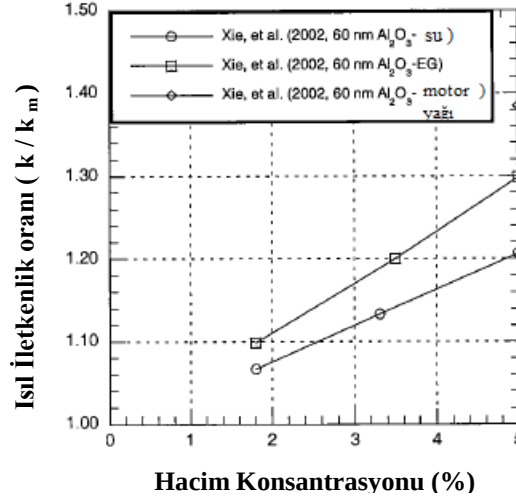
Şekil 1.17. a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su b)  $\text{CuO}$ -su nanoakışkanının pH değerlerinin ısı iletkenlik artış oranına etkisi[19]

Şekil 1.18' te  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su nanoakışkanında sıcaklığın ısı iletkenlik artış oranına etkisi verilmiştir [19]. Grafiklerden anlaşılacağı üzere genel trend, sıcaklık arttıkça ısı iletkenlik oranında da artış olduğu yönündedir. Sonuçlar nanoakışkanların sıcak bölgeleri algılayan akıllı nanoakışkanlar olarak kullanılabileceğini ve bu bölgelerle daha hızlı soğutma sağlanabileceğini belirtmektedir.



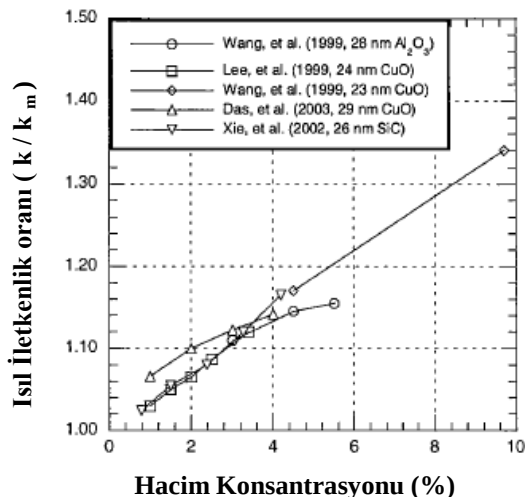
Şekil 1.18.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su nanoakışkanında sıcaklığın ısı iletkenlik artış oranına etkisi[19]

Şekil 1.19.'da temel akışkanın ısı iletkenlik artış oranına etkisi verilmiştir. Temel akışkanın ısı iletkenlik üzerindeki etkisi, genel olarak temel akışkanın ısı iletkenliğindeki artışla iyileştirilmiş ısı iletkenlik oranının düştüğü yönündedir. Yani düşük ısı iletkenliğe sahip temel akışkanın ısı iletkenlik artışının daha fazla olduğu söylenebilir[19].

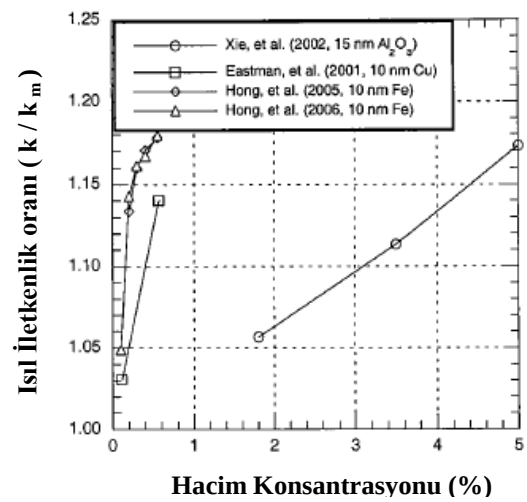


Şekil 1.19. Temel akışkanın ısı iletkenlik artış oranına etkisi[19]

İki farklı partikül için, diğer tüm şartları hemen hemen aynı tutulduğunda, partikül malzemesinin ısı iletkenlik artışına etkisi Şekil 1.20' de verilmiştir. Sonuçlar düşük iletkenlikli partiküller için aslında bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Şekil 1.20. b'de verilen iki metal ile bir oksit partikülleri karşılaştırıldığında, düşük hacimsel oranlarda metal ve oksit partiküller aynı artış oranı göstermişlerdir. Ancak metal partiküllerin yüksek ısı iletkenliğe sahip olmaları nedeniyle oksit partiküllere göre üstün oldukları söylenebilir[19].



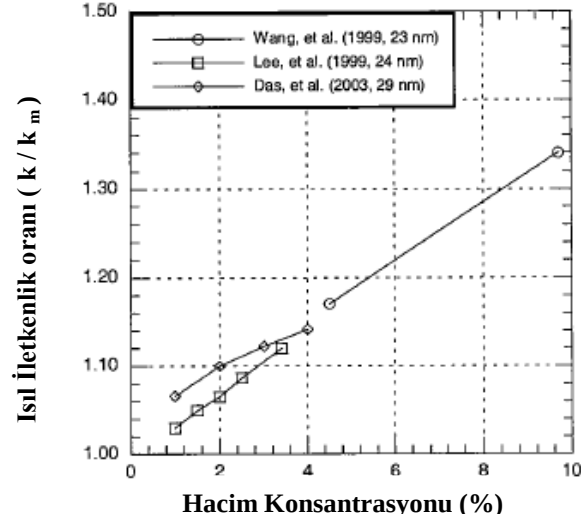
a)



b)

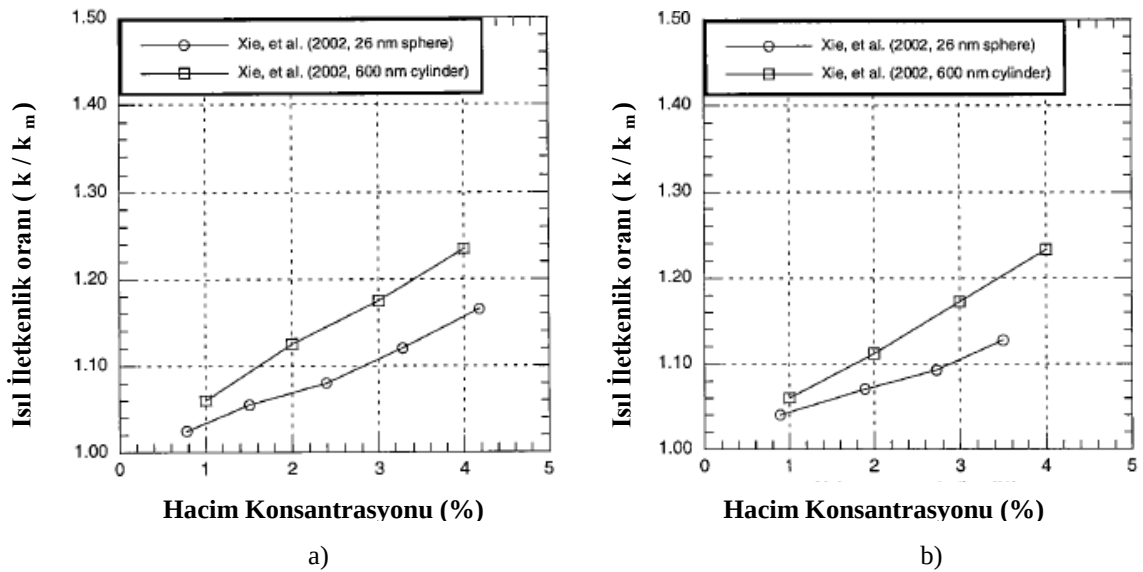
Şekil 1.20. a) Su ve b) Etilen glikol temel akışkanları için partikül malzemesinin ısı iletkenlik artış oranına etkisi

Daha küçük boyutta partikül içeren nanoakışkanın ısı iletkenliği, daha büyük boyutta partikül içerene kıyasla daha fazla artış gösterir. Nanopartiküllerin stokastik hareketi ısı iletkenlikteki artışı açıklamak için neden olabilir. Çünkü küçük partiküller daha kolay hareketlendirilebilirler. Şekil 1.21.' de CuO-su nanoakışkanı için partikül boyutunun ısı iletkenlik artış oranına etkisi verilmiştir[19].



Şekil 1.21. CuO-su nanoakışkanı için partikül boyutunun ısı iletkenlik artış oranına etkisi[19]

Temel olarak çalışmalarda kullanılan iki farklı partikül şekli mevcuttur. Bunlar dairesel ve silindirik nanopartiküllerdir. Şekil 1.22.' de SiC-su ve SiC-EG nanoakışkanları için partikül şeklinin ısı iletkenlik artışına etkisi verilmiştir. Küresel partiküllerin silindirik olanlara kıyasla ısı iletkenliklerinde daha az artış gösterir. Bunun nedeni olarak, silindirik partiküllerin uzunluk-çap oranının daha fazla olduğu söylenebilir[19].

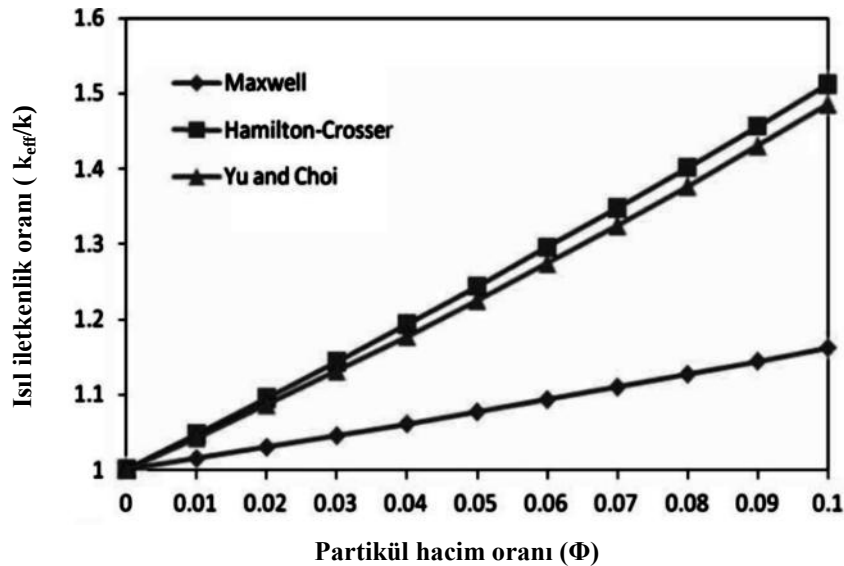


Şekil 1.22. a) SiC-su b) SiC-EG nanoakışkanları için partikül şeklinin ısı iletkenlik artışına etkisi[19]

### 1.4.1.3. Nanoakışkanların Isıl İletkenlik Tahmini İçin Modeller

Nanoakışkanların ısı iletkenliğini tahmin etmek için literatürde çok iyi denebilecek düzeyde teorik bir yaklaşım yoktur. Mühendislik sistemlerinde kullanımıyla ilgili son yıllarda özellikle ısı transferi akışkanı olarak kullanılan yeni süspansiyonların taşınım karakteristiklerini belirlemeye ve süspansiyonların ısı iletkenliklerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmaların, modeller geliştirmeye yönelik olduğu görülmektedir. Karışım içinde sadece küresel partiküllerin bulunması durumunda geçerli olan bir model Maxwell tarafından geliştirilmiştir[1]. Maxwell modeli nispeten daha büyük partiküllü katı-sıvı karışımlar için önerilen ısı iletkenlik için mevcut genel bir modeldir. Maxwell modeli süspansiyonun efektif ısı iletkenliğinin dairesel partikülün ısı iletkenliğine, temel akışkana ve katı partikülün hacimsel oranına bağlı olduğunu göstermiştir. Nanoakışkanların ısı iletkenliklerini tahmin etmek için araştırmacılar tarafından geliştirilen modeller Tablo 1.3’ te verilmiştir[107]. Tabloya göre verilen modellerde  $k_p$  partikülün ısı iletkenliği,  $k_l$  esas akışkanın ısı iletkenliği,  $k_e$  partikül/sıvı süspansiyonunun efektif ısı iletkenliği,  $\phi$  (phi) süspansiyonun partikül hacim oranı,  $\alpha$  (alfa) ısı iletkenlikler oranı, ( $\alpha = k_p/k_l$ ),  $\beta$  (beta) = ( $\alpha - 1$ )/( $\alpha + 2$ ) ve  $n$  partikül şekil faktörü olarak tanımlanmıştır.  $\beta$  ise nano katman kalınlığının partikül yarıçapına oranıdır.

Üç modelin (Maxwell, Yu – Choi ve Hamilton- Crosser) farklı partikül hacim oranlarında artan ısı iletkenlik oranları Şekil 1.23.’ te karşılaştırılmıştır. Bütün modellerde artan hacimsel oranla ısı iletkenlik oranında lineer bir artış gözlenmiştir. En yüksek değer Hamilton-Crosser modelinde görülmüştür[46].



Şekil 1.23.  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanı için farklı partikül hacim oranlarında ısı iletkenlik oranına etkisi[46]

**Tablo 1.3.** Katı/sıvı süspansiyonları için efektif ısıl iletkenlik modelleri

| Modeller         | İfadeler                                                                                                                                                                                                      | Açıklamalar                                                                                                                                                                                    |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Maxwell          | $\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_1 + 2(k_p - k_1)\phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)\phi}$                                                                                                                        | Küresel partiküller için geçerlidir.                                                                                                                                                           |
| Hamilton-Crosser | $\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + (n-1)k_1 - (n-1)(k_1 - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_1 + (k_1 - k_p)\phi}$                                                                                                            | Küresel ve küresel olmayan partiküller dikkate alınmıştır; küresel partiküller için n=3, silindirik partiküller için n= 6                                                                      |
| Wasp             | $\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_1 - 2(k_1 - k_p)\phi}{k_p + 2k_1 + (k_1 - k_p)\phi}$                                                                                                                        | Katı-sıvı karışımların ısıl iletkenliğini hesaplamak için önerilmiştir.                                                                                                                        |
| Yu - Choi        | $\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_1 + (k_p - k_1)(1+\beta)^3 \phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)(1+\beta)^3 \phi}$                                                                                                 | İki fazlı karışımların etkili ısıl iletkenliğini hesaplamak için alternatif bir teoridir.                                                                                                      |
| Bruggeman        | $k_e = \frac{1}{4} \left[ (3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_l \right] + \frac{k_l}{4} \sqrt{\Delta}$<br>$\Delta = \left[ (3\phi - 1)^2 (k_p / k_l)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2)(k_p / k_l) \right]$ | Homojen küresel partiküller içeren iki fazlı karışımlar için önerilmiştir.                                                                                                                     |
| Jeffrey          | $\frac{k_e}{k_l} = 1 + 3\beta\phi + (3\beta^2 + \frac{3\beta^3}{4} + \frac{9\beta^3}{16} \frac{\alpha + 2}{2\alpha + 3} + \frac{3\beta^4}{2^6} + \dots)\phi^2$                                                | Yüksek dereceli terimler rastgele dağılmış olan küreciklerin etkileşimlerini ifade etmektedir.                                                                                                 |
| Davis            | $\frac{k_e}{k_l} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)\phi} \left[ \phi + f(\alpha)\phi^2 + 0(\phi^3) \right]$                                                                               | Yüksek dereceli terimler rastgele dağılmış olan küreciklerin etkileşimlerini ifade etmektedir. f(10)=2.5      f(∞)= 0.5                                                                        |
| Lu-Lin           | $\frac{k_e}{k_l} = 1 + \alpha\phi + b\phi^2$                                                                                                                                                                  | Küresel ve küresel olmayan partiküller için geçerlidir. Küresel partiküllerde α=10 için, a=2.25, b=2.27; α=∞ için a=3.00, b=4.51<br>Yakın ve uzak alan çiftlerin etkileşimleri dikkate alınır. |

#### 1.4.2. Viskozite

Viskozite akışkanın en önemli akış özelliklerindendir. Pompalama gücü, laminar akıştaki pompalama gücü ve taşınım ısı transferi direkt olarak akışkanın viskozitesi ile ilgilidir. Nanoakışkanların viskozitesini tahmin etmek için bazı formüller geliştirilmiştir. Araştırmacılar tarafından geliştirilen modeller Tablo 1.4’ de verilmiştir[30]. Literatürde birçok çalışmada

- sıcaklık,
- partikül boyutu ve şekli,
- partikül boyut dağılımı,
- yüzey gerilimi,
- yüzey aktif madde,
- partikül hacimsel oranı gibi bazı parametrelerin nanoakışkanların viskozitesi üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir.

Yapılan çalışmaların hemen hemen tümünde nanoakışkanın viskozitesinin temel akışkanın viskozitesinden daha fazla olduğu belirtilmiştir. Partikül konsantrasyonunun artışıyla nanoakışkanın viskozitesinin arttığı tespit edilmiştir. Partikül hacimsel oranı arttığı zaman partikül sayısı da artar ve bunun sonucu olarak viskozite de artar. Sıcaklık arttığı zaman akışkanın molekülleri gibi nanopartiküller ve akışkan arasındaki etkileşim zayıflar. Bu nedenle artan sıcaklıkla viskozite düşer. Süspansiyonda partikül kütlesini sabit tutarken partiküllerin boyutunu azaltmak sistemdeki partiküllerin sayısında artışa neden olur. Çok sayıda küçük partikül, daha fazla partikül-partikül etkileşimine neden olur. Bunun sonucu olarak akış direnci ve viskozite artar. Yüzey aktif maddenin konsantrasyonu nanoakışkanın viskozitesini etkiler. Yüzey aktif maddenin konsantrasyonunun artışıyla nanoakışkanın viskozitesinin arttığını birçok araştırmacı belirtmişlerdir. Nanoakışkan non-Newtonien davranış gösterir çünkü kayma hızı arttığı zaman partikül-partikül etkileşimi zayıflar hatta kopar. Bu nedenle aşağıda verilen Newtonien akışkan özelliklerini taşımamaktadır;

-Kayma gerilmesinin kayma hızına oranı (viskozite) sabittir.

-Viskozite sadece sıcaklığa bağlıdır, yüzey gerilimi ve zamanın etkisi yoktur.

-Kayma hızı kayma gerilmesiyle orantılıdır[35].

**Tablo 1.4.** Katı/sıvı süspansiyonları için viskozite modelleri

| Modeller              | İfadeler                                                                         | Açıklamalar                                                                                                      |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Einstein              | $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5\phi$                                           | Küresel partiküllerin çok düşük hacimsel oranlarda ( $\phi < 0.02$ )                                             |
| Krieger and Dougherty | $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \left[ 1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right]^{-\eta\phi_m}$  | Değişken paketleme fraksiyonlu rastgele tek dağılımlı ve sert küreler için                                       |
| Neilson               | $\mu_{nf} = (1 + 1.5\phi) e^{\frac{\phi}{(1-\phi_m)}} \mu_f$                     | Parçacık hacim oranı en fazla 0.02 için güç kanunu modeli geçerli                                                |
| Mooney                | $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = e^{\left( \frac{\xi\phi}{1-k\phi} \right)}$            | Self-crowding faktörü ( $1.35 < k < 1.91$ ) ve geçme parametresi 2.5                                             |
| Batchelor             | $\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2) \mu_f$                                     | Brown hareketi dikkate alınarak Einstein modeli uzatma                                                           |
| Lundgren              | $\mu_{nf} = \left[ 1 + 2.5\phi + \frac{25}{4}\phi^2 + f(\phi^3) \right] \mu_f$   | $\phi$ Taylor genişleme serisinden formüle edilen Einstein modelinin azaltılması                                 |
| Brinkman              | $\mu_{nf} = (1 - \phi)^{2.5} \mu_f$                                              | Einstein modelinden formüle edilmiştir. 4% 'den az partikül konsantrasyonlarda sürekli bir ortam için geçerlidir |
| Chen et al.           | $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \left( 1 - \frac{\phi_a}{\phi_m} \right)^{-2.5\phi_m}$ | Krieger-Dougherty denkleminde modifiye edilmiştir. Parçacıkların kümelenmesi düşüldüğü için                      |

|                     |                                                                                                                                                                               |                                                                                                            |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Franken and Acrivos | $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{9}{8} \left[ \frac{\left( \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{1/3}}{\phi_m - \phi^{1/3}} \right]$                                                    | Küresel partiküller ve<br>0.5236 < $\phi$ < 0.7405 için geçerlidir<br>$\phi$ , deneysel olarak belirlenir. |
| Ward                | $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \left[ 1 + \eta \phi_{eff} + 2.5\eta + (2.5\eta)^2 + ..... \right]$                                                                                 | Küresel parçacıklar için % 35'e kadar üstel modeli                                                         |
| Kitano              | $\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{\left[ 1 - \left( \frac{\phi}{\phi_m} \right) \right]^2}$                                                                                            | Maksimum parçacık hacmi konsantrasyonuna göre                                                              |
| Bicerano            | $\mu_{nf} = (1 + \eta\phi + k_H\phi^2)$                                                                                                                                       | Viskoziteye hacimsel etkisi düşünülerek                                                                    |
| Tseng and Chen      | $\mu_{nf} = \mu_f \times 0.4513e^{0.6965\phi}$                                                                                                                                | Nikel / terpineol nanosivılar için ses konsantrasyonu düşünülerek                                          |
| Graham              | $\mu_{nf} = \mu_f \left( 1 + 2.5\phi + 4.5 \left[ \frac{1}{\left( \frac{h}{d_p} \left( 2 + \frac{h}{d_p} \right) \right) \left( 1 + \frac{h}{d_p} \right)^2} \right] \right)$ | Franken-Acrivos modelinin modifiye formu. Parçacık yarıçapı ve parçacıklar arası aralık mevcutsa           |
| Masoumi et al.      | $\mu_{nf} = \mu_f \left( 1 + \frac{\rho_N V_b d_N^2}{72C\delta\mu_f} \right)$                                                                                                 | Parçacıkların Brownian hareketine dayanır ve alümina / su nanosivılar için geçerli                         |

|                      |                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                              |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pak and Cho          | $\mu_{nf} = \mu_f (1 + 39.11\phi + 533.9\phi^2)$                                                                                                                                                    | Oda sıcaklığını referans alarak geliştirilen                                                                                 |
| Kulkarni             | $\ln(\mu_{nf}) = -(2.8751 + 53.548\phi - 107.12\phi^2) + \frac{(1078.3 + 15857\phi + 20587\phi^2)}{T}$                                                                                              | 5-50° C sıcaklık aralığında CuO-su nanosıvılar için geçerlidir.                                                              |
| Nguyen et al.        | $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (2.1275 - 0.0215T + 0.00027T^2)$                                                                                                                                          | Sıcaklığa bağlı viskozite ve % 1-4 parçacık hacim konsantrasyonlu                                                            |
| Namburu et al.       | $\text{Log}(\mu_{nf}) = Ae^{-BT}$                                                                                                                                                                   | Sıcaklığa bağlı % 1-10 hacimsel konsantrasyonlu Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –su nanosıvılar için -35 ile 50 °C de geçerli |
| Chandrasekhar et al. | $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + b\left(\frac{\phi}{1 - \phi_m}\right)^n$                                                                                                                              | Elektromanyetik, mekanik ve geometrik açıdan düşünülerek                                                                     |
| Abu–Nada             | $\mu_{nf} = -0.155 - \frac{19.582}{T} + 0.794\phi + \frac{2094.47}{T^2} - 0.192\phi^2 - 8.11\frac{\phi}{T} - \frac{27463.863}{T^3} + 0.127\phi^3 + 1.6044\frac{\phi^2}{T} + 2.1754\frac{\phi}{T^2}$ | Sıcaklığa bağlı model, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanoakışkanları için                                                   |
| Masud Hosseini       | $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \exp\left[m + \alpha\left(\frac{T}{T_o}\right) + \beta(\phi_h) + \gamma\left(\frac{d}{1-r}\right)\right]$                                                                 | Sıcaklığa bağlı model, Hidrodinamik hacimsel oran ve kapama tabakasının kalınlığı düşünülerek                                |
| Avsec and Oblac      | $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \left[1 + 2.5(\phi_{eff} + 2.5\phi_{eff}^2 + (2.5\phi_{eff}^2) + .....)\right]$                                                                                           | Ward ve Einstein modelden genişletilmiş                                                                                      |

### 1.4.3. Özgül Isı

İlk olarak 1998 ‘de Pak ve Cho [39] tarafından yapılan çalışmayla nanoakışkanların özgül ısısının ölçümünde kullanılacak aşağıdaki Eşitlik (1.1) elde edilmiştir:

$$C_{nf} = (1 - \phi_v)C_w + \phi_v C_p \quad (1.1)$$

$C_w$  suyun özgül ısısı,  $C_p$  partikülün özgül ısısı,  $\phi_v$  hacimsel oran olarak verilmiştir. Daha sonra 2000’de Xuan ve Roetzel [108] daha doğru sonuçlar veren Eşitlik (1.2) de verilen formülü elde etmişlerdir.

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (1.2)$$

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p$$

Vajjha ve Das [109] daha önceki eşitlikle ölçümlerin tam olarak uyuşmadığını görüp yaptıkları çalışmayla yeni genel bir bağıntı elde etmişlerdir. Eşitlik (1.3) te verilen bağıntıyla,

$$(C_{pnf} / C_{pbf}) = \left[ (A \times T) + B \times (C_{pbf}) \right] / (C + \phi) \quad (1.3)$$

hata oranını % 2.7 olarak tespit etmişlerdir. Daha sonra birçok araştırmacı yeni bağıntılar elde etmişlerdir. Aşağıda Eşitlik ( 1.4, 5, 6, 7, 8 ) ile özgül ısı bağıntıları verilmiştir:

$$\text{Vajjha ve Das [110]} \quad (C_{pnf} / C_{pbf}) = \frac{\left[ A(T / T_o) + B(C_{pp} / C_{pbf}) \right]}{(C + \phi)} \quad (1.4)$$

$$\text{Zhou ve ark. [111]} \quad [C_{pnf} = \left[ 1 - \phi \quad \rho_f C_{bf} + \phi \rho_{np} C_{pnp} \right] / \left[ \phi_f \rho_f + (1 - \phi) \rho_{np} \right]] \quad (1.5)$$

$$\text{Shin ve Banerjee [112]} \quad C_{p,t} = \frac{\rho_{np} \phi_{np} C_{p,np} + \rho_s \phi_s C_{p,s} + \rho_{ns} \phi_{ns} C_{p,ns}}{\rho_{np} \phi_{np} + \rho_s \phi_s + \rho_{ns} \phi_{ns}} \quad (1.6)$$

$$\text{Pakdaman [113]} \quad (C_{pbf} - C_{pnf}) / C_{pbf} = (0.0128 \times T + 1.8382) \times \phi^{0.4779} \quad (1.7)$$

$$\text{Kumaresan ve Velraj [114]} \quad (C_p)_{nf} = \left[ 1 - \phi \quad \rho C_{p_f} + \phi \quad \rho C_{p_n} \right] / \left[ \phi \rho_n + (1 - \phi) \rho_f \right] \quad (1.8)$$

Bu eşitlikler kullanılarak, akışkan içerisine katı partikül katıldığı zaman özgül ısıda küçük bir düşüşün olacağı tahmin edilebilir.

#### 1.4.4. Yoğunluk

Literatürde ilk olarak mikrometre boyutlu parçacıkların iki fazlı karışımları için yoğunluk ifadesi 1986 'da Cheremisinoff tarafından elde edilmiştir[115]. Daha sonra aynı eşitliği Pak ve Cho [39] nanoakışkanlara uygulayarak aşağıdaki eşitliği (1.9) elde etmiştir:

$$\rho_{nf} = \rho_p \varphi + \rho_{bf} (1 - \varphi) \quad (1.9)$$

$\rho_{nf}$  nanoakışkan yoğunluğu,  $\rho_p$  partikül yoğunluğu,  $\varphi$  hacimsel oran,  $\rho_{bf}$  temel akışkan yoğunluğunu ifade etmektedir. Eşitlik (1.9) dan anlaşılabacağı üzere nanoakışkanın yoğunluğu hacimsel oranla lineer eğilim göstermektedir.

#### 1.5. Nanoakışkanların Uygulama Alanları

Nanoakışkanlar sanayi, ticari, medikal, konut ve ulaştırma gibi birçok alanda performansın artırılması için kullanılabilir[56].

1. *Elektronikte:* Hızlı gelişen modern teknoloji sayesinde son model elektronik cihazlar, cihazın performansını düşüren, ömrünü kısaltan ve güvenilirliğini etkileyen, büyük miktarda ısı üretmektedirler. Nanoakışkanlar mikro kanallarda tıkanmadıklarından soğutucu akışkan olarak kullanılabilir. Mikroelektronik (MEM) sistemlerden mikro-düzeyde tam fonksiyonel pompalar, motorlar vb. kullanılmaktadır. Bu sistemlerin mikro düzeyden nano düzeye geçişi üzerine çalışılmaktadır.
2. *Araçlarda:* Yağlayıcı maddeler veya şanzıman yağları, motor soğutucuları, otomatik iletim akışkanları ve diğer sentetik yüksek sıcaklık akışkanları oldukça zayıf ısı transfer kabiliyetine sahiptirler. Bu akışkanlara nanopartiküllerin ilave edilmesi durumunda daha yüksek ısıl iletkenlik sağlanabilir. Böylece ilerde motor, pompa, radyatör ve diğer parçaların daha küçük ve hafif üretilmesini de sağlanacaktır.
3. *Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinde:* Isı değiştiricileri, ısı pompaları, ısı boruları gibi sistemlerde nanoakışkan kullanılarak ısı transfer kabiliyeti artırılabilir. Böylece artan performansla yatırım maliyeti düşürülebilir.
4. *Tıbbi uygulamalarda:* Mikro cerrahide (göz, beyin vb.), diagnostik kitlerde, bilimsel araştırmalarda, yüzey karakterizasyonu ve modifikasyonu, mikroorganizmaların taşınması, DNA modifikasyonu vb. gibi uygulamaların geliştirilmesinde kullanılabilir.

5. *Malzemelerde:* Saydamlık, azalan ağırlık, artan dayanım özelliklerini gösteren malzemeler, giyenin sağlık ve fiziki durumu hakkında uyarılar veren akıllı kumaşlar örnek olarak verilebilir. Tarımsal materyalin faydalı ürünlere dönüştürülmesi ve bu sayede çevrenin korunumu nanoteknoloji sayesinde gerçekleştirilebilecektir. Günümüzde özellikle bitkisel yağların biyo-yakıtlara ve endüstriyel çözeltilere dönüştürülebilmesinde ihtiyaç duyulacak nanokatalizörlerin geliştirilmesi ve tasarımı konusunda çalışmalar yapılmaktadır[116].

Ayrıca küçültülmüş sensörler, motorlar, valfler, yakıt hücreleri, tıbbi aletler mikro ürünlerin çeşitlerindendir. Yukarıda çeşitli uygulama alanları verilen nanoteknoloji sayesinde tüm bu işlemlerin oldukça basite indirgenmesi, çok daha doğru kararların doğru zamanda verilmesi ve doğru önlemlerin alınabilmesi mümkün olacaktır.

## 1.6. Isı Transfer Mekanizmaları

Bir ortam içinde veya ortamlar arasında, bir sıcaklık farkının mevcut olduğu her durumda ısı transferi mutlaka gerçekleşir. Durgun bir katı veya akışkan ortam içinde, bir sıcaklık farkı olması durumunda, ortam içinde gerçekleşen ısı transferi için, iletim terimi kullanılır. Buna karşın, bir yüzey ile hareket halindeki bir akışkan farklı sıcaklıklarda ise, aralarında gerçekleşen ısı transferi, taşınım terimi ile yorumlanır. Sonlu sıcaklığa sahip tüm yüzeyler elektromanyetik dalgalar halinde enerji yayarlar. Farklı sıcaklıktaki iki yüzey arasında, birbirlerini görmeye engel bir ortam yoksa meydana gelen ısı alış verişine ışıınım adı verilir.

İletim bir ortamdaki sıcaklık farkı nedeniyle enerji transferini gösterir ve fiziksel mekanizması rasgele atomik veya moleküler hareketliliklidir. Isı iletimi Fourier yasası ile tanımlanır. Sabit kesit alanına sahip bir cisimden bir boyutlu, kararlı ısı iletimi aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad , \quad q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (1.10)$$

Taşınım, kitle hareketi, sıcak ve soğuk akışkan elamanların makroskopik parçalarının karışması, soğutucu ortam içindeki ısı iletimi ve enerji depolamanın bir bileşimidir. Eğer taşınım olayı akışkan içindeki sıcaklık değişimlerinin neden olduğu yoğunluk farklarından kaynaklanan kaldırma kuvvetleri ile ilişkili ise buna doğal (veya serbest) taşınım denir. Buna karşılık, akış bir fan, pompa veya atmosferik rüzgarlar gibi bir dış etki ile oluşuyorsa bu

durumda zorlanmış taşınım söz konusudur. Sıcak bir nesneden soğutucu akışkana olan ısı transferi Newton'un Soğutma Yasası olarak bilinen aşağıdaki eşitlikte ilişkilendirilmektedir:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (1.11)$$

Konveksiyon katsayısı  $h$ , akış yönündeki katı cismin şekli ve boyu gibi bir takım fiziksel geometrilere ve akışkanın tipi ve çalışma sıcaklığı gibi termofiziksel özelliklerine bağlıdır. Isı alıcılarda bu özelliklerle birlikte kanatlar arasındaki boşluklar soğutma alanını belirlediği için kanatlar arasındaki boşlukta konvektif ısı transfer katsayısını etkilemektedir. Zorlanmış konveksiyonla ısı transferinde ısı transferi katsayısı akışı karıştıran ve vorteksler üreten yüzeyler boyunca akışkanın sahip olduğu lineer hızına oldukça bağlıdır.

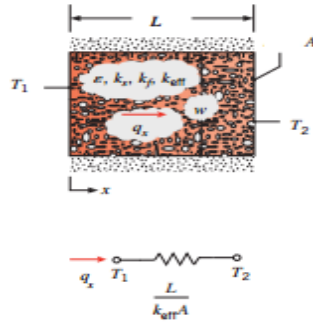
Radyasyonla ısı transferi sonlu sıcaklıktaki malzeme tarafından yayılan ve elektromanyetik dalgalarla iletilen enerjidir. Enerji iletim ve taşınım transfer edilirken bir madde ortamına gerek duyar, fakat radyasyonda buna gerek yoktur. Sonlu sıcaklıktaki her bir cisim ya da nesne radyasyon yaydığı gibi aynı zamanda bu cisim ya da nesneler çevrelerindeki radyasyon yayan cisimlerin yaydığı bu radyasyonlar için alıcı konumundadır. Bu olay radyasyonun soğurulması olarak bilinir. Bu nedenle radyasyonun etkisinden bahsedilirken aşağıdaki eşitlikle verilen bir yüzey ve çevresi arasındaki net radyasyon ısı değişim miktarını dikkate almak gerekmektedir;

$$q''_{rad} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (1.12)$$

Endüstriyel uygulamaların birçoğunda ısı transferinin bu üç şekilde mevcuttur. Bununla birlikte uygulamadaki çalışma şartlarına ve dominant ısı transferi türüne göre biri veya bir kaçını ihmal edilebilir[117].

### 1.6.1. Nanoakışkanlarda Isı Transferi

Nanoakışkanların ısı transferine etkilerini inceleyen araştırmacılar, nano boyutta partikül katılmış olan akışkanlarda sadece ısı iletkenliğinin değil aynı zamanda ısı transfer katsayısının da temel akışkanlı sistemlere göre çok büyük olduğunu gözlemlemişlerdir.



**Şekil 1.24.** Nanoakışkanların ısı transfer özellikleri

Sıvıların ve katıların karışımları ile elde edilen süspansiyonun ısı transfer özelliklerini uyarlamak için aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$q_x = \frac{k_{eff} A}{L} (T_1 - T_2) \quad (1.13)$$

Eğer akışkan hareketi önemsizse, ortamdaki ışıyım ısı transferi de ihmal edildiğinde yukarıdaki eşitlik geçerlidir. Eşitlikteki  $k_{eff}$  efektif ısı iletkenliktir. Efektif ısı iletkenlik ortamının gözeneklilik veya hacim fraksiyonu ile değişir. Ayrıca katı ve sıvının ısı iletkenliğine de bağlıdır.

Farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar hem laminar hem de türbülanslı akış koşullarında nanoakışkanın ısı transfer katsayısındaki artışın ısı iletkenlikten daha fazla olduğunu göstermiştir.

Taşımanın temel yasası Fourier'in iletim yasası teklif edilmeden önce Newton tarafından ilan edilmiştir ve Newton'un soğuma yasası olarak adlandırılmıştır.

$$Q = hA(T_w - T_f) \quad (1.14)$$

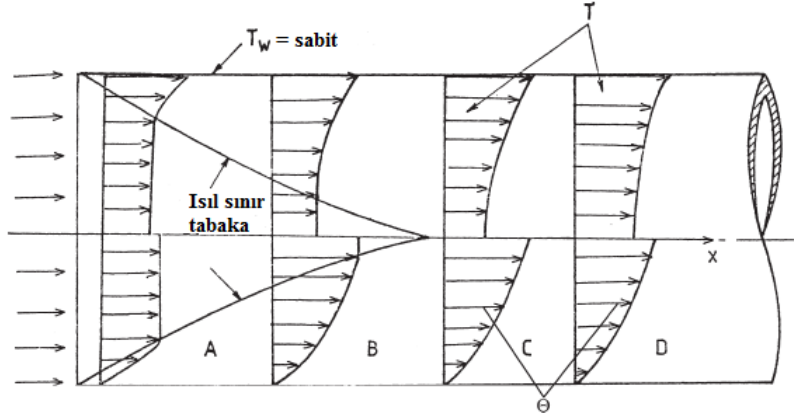
Burada Q duvarla hareketli sıvı arasındaki ısı transferidir. A ise katı-sıvı arasındaki ortak yüzey alanıdır.  $T_w$  yüzey sıcaklık ortalaması,  $T_f$  ise sıvının giriş ve çıkış sıcaklığı ortalamasıdır[119]. Taşıyma ısı transferi sınır tabaka içindeki akışkanın hem rastgele moleküler hareketi, hem de kitlesel hareketiyle gerçekleşir. Alman bilim adamı Ludwig Prandtl, basit bir akış durumunda viskozite ve sürtünmenin etkisiyle duvara yakın bir bölgede ince bir tabaka gözlemlemiştir. Bu tabakayı sınır tabaka olarak adlandırmıştır. İki çeşit sınır tabaka vardır;

- Isıl sınır tabaka
- Hidrodinamik sınır tabaka

Hidrodinamik ve ısı iletkenlik sınır tabaka kalınlıkları birbirinden farklıdır ve Prandtl sayısı ile belirlenir[5];

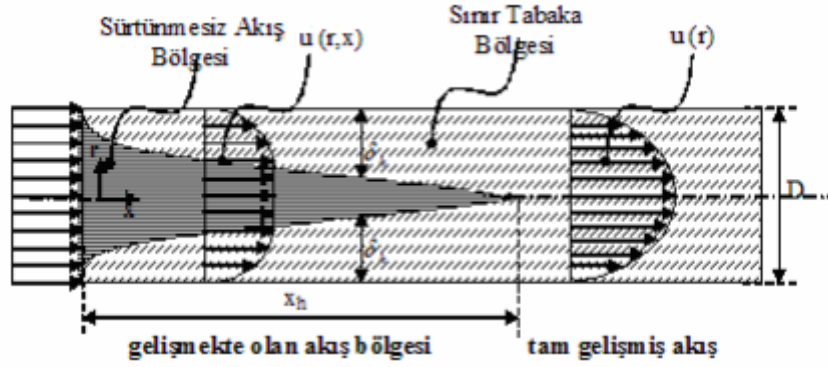
$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (1.15)$$

**Isıl Sınır Tabaka:** Bir akışkan Şekil 1.25.'de görülen boruya yüzey sıcaklığından daha düşük sabit bir sıcaklıkta  $T(r,0)$  girerse, taşınım ile ısı transferi gerçekleşir ve ısıl sınır tabaka gelişmeye başlar. Bununla birlikte boru yüzey şartları sabit sıcaklık ( $T_s=\text{sabit}$ ) veya sabit ısı akısı ( $q_s=\text{sabit}$ ) olsun, ısıl olarak tam gelişmiş bir duruma ulaşılır[118]. Tam gelişmiş sıcaklık profilinin  $T(r,x)$  biçimi, sabit yüzey sıcaklığı veya ısı akısı sınır koşuluna göre değişir. Bununla birlikte her iki yüzey koşulu için, akışkanın sıcaklığı boru boyunca artar. Eğer  $Pr>1$  ise, hidrodinamik sınır tabaka ısıl sınır tabakadan çok daha hızlı bir şekilde geliştiği,  $Pr<1$  ise tersinin olacağı görülür. Boru girişinde ısıl sınır tabaka kalınlığı sıfır olduğundan,  $x=0$ 'da taşınım katsayısı çok büyüktür. Ancak ısıl sınır tabaka gelişirken, ısı transfer katsayısı ( $h$ ), tam gelişmiş koşullardaki sabit değerine ulaşana kadar hızla azalır.



**Şekil 1.25.** Isıl sınır tabaka gelişimi

**Hidrodinamik Sınır Tabaka:** Şekil 1.26.'daki gibi bir dairesel borudaki laminar akışı göz önüne aldığımızda akışkan boruya sabit hızla giriş yaparsa, akışkan yüzeye temas ettiğinde, sürtünme etkileri önem kazanmakta ve boru içinde ilerledikçe sınır tabaka gelişmektedir. Bu gelişme akış bölgesinin giderek küçülmesi ve boru ekseninde sınır tabakaların birleşmesiyle sona erer. Bu birleşme noktasından sonra, sürtünme tüm kesit boyunca etkili olur ve hız profili artık  $x$  ile değişmez. Bu noktadan sonra akış hidrodinamik olarak tam gelişmiştir. Girişten bu koşulun gerçekleştiği noktaya kadar olan uzaklık hidrodinamik giriş uzunluğu,  $x_{fd,h}$  olarak tanımlanır. Tam gelişmiş hız profili şekilden de görüldüğü gibi laminar akış için paraboliktir. Türbülanslı akış durumunda radyal doğrultudaki türbülanslı karışımından dolayı hız profili daha düzdür[117]



Şekil 1.26. Hidrodinamik sınır tabaka gelişimi

Moleküllerin söz konusu rastgele hareket nedeni ile yüksek konsantrasyonlu bir bölge düşük konsantrasyonlu bir bölge ile temasa geçirilince yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyonlu bölgeye doğru difüzyonla bir akış izlenecektir. Süspansiyondaki parçacıkların Brownian hareketi nedeni ile belirli bir zamanda ortalama olarak ne kadar yol gittiğini hesap etmek ve bunun büyüklük mertebesi parçacığın çökme eğilimi ile kıyaslanarak bulunabilir. Bu tip difüzyon olayları kütle transferi, sedimentasyon, yoğunluk akımları ve taşınımında gözlemlenir[5].

### 1.7. Güneş Enerjisi ve Teknolojileri

Dünya genelinde yenilenebilir temelli enerji kaynaklarına yönelim sürekli artmaktadır. Ülkemizde de enerji profili gözden geçirildiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının yeri ve önemi açıkça görülmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı oldukça düşük düzeydedir (%1 ve altında) ve bu enerji türleri ile yeterince ilgilenilmemektedir. Özellikle, güneş ve rüzgar enerjisinin kullanımı, ülkemizin enerji bütçesine ciddi katkılar sağlayacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından doğru ve sağlıklı bir biçimde yararlanılması için gereken strateji, plan ve politikaların önemi giderek artmakta ve önemli boyutlara ulaşmaktadır.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğünce hazırlanan, Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2.737 saat (günlük toplam 7,5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi 1.527 kWh/m<sup>2</sup>.yıl (günlük toplam 4,2 kWh/m<sup>2</sup>) olduğu tespit edilmiştir. Güneş enerjisi teknolojileri yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte iki ana gruba ayrılabilir:

Isıl Güneş Teknolojileri ve Odaklanmış Güneş Enerjisi (CSP): Güneş enerjisinden ısı elde edilen bu sistemlerde, ısı doğrudan kullanılabileceği gibi elektrik üretiminde de kullanılabilir.

Güneş Hücreleri: Fotovoltaik güneş elektrliği sistemleri de denilen yarıiletken malzemeler güneş ışığını doğrudan elektrığe çevirirler. Ülkemizde 2012 yılı itibari ile toplam kurulu

güneş kolektör alanı yaklaşık 18.640.000 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Yıllık düzlemsel güneş kolektörü üretimi 1.164.000 m<sup>2</sup>, vakum tüplü kolektör ise 57.600 m<sup>2</sup> olarak hesap edilmiştir. Üretilen düzlemsel kolektörlerin %50'si, vakum tüplü kolektörlerin tamamı ülke içerisinde kullanıldığı bilinmektedir. 2012 yılında güneş kolektörleri ile yaklaşık olarak 768.000 TEP (Ton Eşdeğer Petrol) ısı enerjisi üretilmiştir. Üretilen ısı enerjisinin, 2012 yılı için konutlarda kullanım miktarı 500.000 TEP, endüstriyel amaçlı kullanım miktarı 268.000 TEP olarak hesaplanmıştır[119].

### **1.7.1. Isıl Uygulamalar**

Güneş enerjisinden faydalanarak elde edilen ısıl uygulamalar, sistemin özelliğine ve kullanım amacına göre düşük, orta ve yüksek sıcaklık uygulamaları olarak üç kısma ayrılır.

#### **1.7.1.1. Düşük Sıcaklık Uygulamaları (20 °C - 100 °C)**

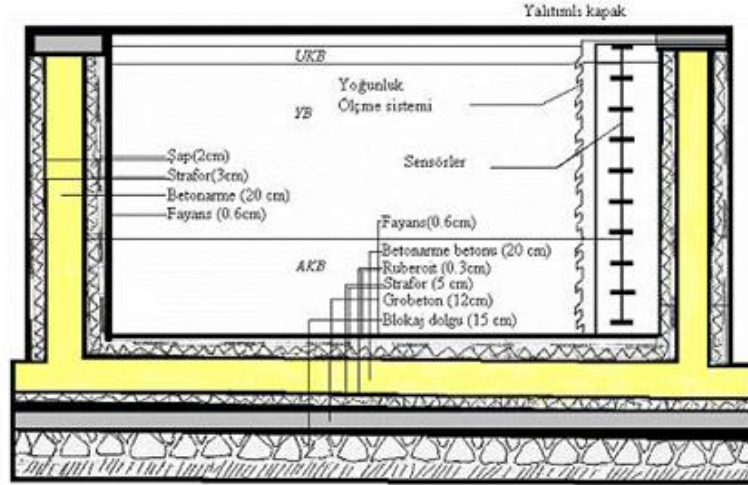
Belirtilen bu uygulamalarda güneş ışıınımı bir ısı toplayıcısı (genellikle kolektör) aracılığıyla bir akışkana (su, hava, hidrojenli hidrokarbonlar vb.) aktarılır ve sıcaklığı artan akışkan faydalanma amacına göre depolanır veya sisteme gönderilir. Düşük sıcaklık uygulamalarında sıcak su temini, konut ısıtması ve sera ısıtması diğer uygulamalara göre daha ekonomiktir.

Bu uygulamalar;

- Konutların sıcak su temini,
- Mekan ısıtma,
- Sera ısıtma,
- Güneş havuzlan,
- Güneş bacaları,
- Su arıtma sistemleri,
- Ürün kurutma,
- Tuz üretimi,
- Güneş ocakları,
- Güneş pompaları,
- Soğutma sistemleridir.

*Güneş Havuzları:* Yaklaşık 5-6 metre derinlikteki suyla kaplı havuzun siyah renkli zemini, güneş ışıınımını yakalayarak 90°C sıcaklıkta sıcak su eldesinde kullanılır. Havuzdaki ısınnın dağılımı suya eklenen tuz konsantrasyonu ile düzenlenir, tuz konsantrasyonu en üstten

alta doğru artar. Böylece en üstte soğuk su yüzeyi bulursa bile havuzun alt kısmında doymuş tuz konsantrasyonu bulunan bölgede sıcaklık yüksek olur. Bu sıcak su bir eşanjöre pompalanarak ısı olarak yararlanılabileceği gibi Rankin çevrimi ile elektrik üretiminde de kullanılabilir. Güneş havuzları konusunda en fazla İsrail'de çalışma ve uygulama yapılmıştır. Bu ülkede 150 kW gücünde 5 MW gücünde iki sistemin yanında Avustralya'da 15 kW ve ABD'de 400 kW gücünde güneş havuzları bulunmaktadır[65].



Şekil 1.27. Güneş havuzu örneği[65]

**Güneş Bacaları:** Bu yöntemde güneşin ısı etkisinden dolayı oluşan hava hareketinden yararlanılarak elektrik üretilir. Güneşe maruz bırakılan şeffaf malzemeyle kaplı bir yapının içindeki toprak ve hava, çevre sıcaklığından daha çok ısınacaktır. Isınan hava yükseleceği için, çatı eğimli yapılp, hava akışı çok yüksek bir bacaya yönlendirilirse baca içinde 15 m/sn hızda hava akışı rüzgar oluşacaktır. Baca girişine yerleştirilecek yatay rüzgar türbini bu rüzgarı elektriğe çevirecektir. Bir tesisin gücü 30-100 MW arasında olabilir. Deneysel bir kaç sistem dışında uygulaması yoktur[65].



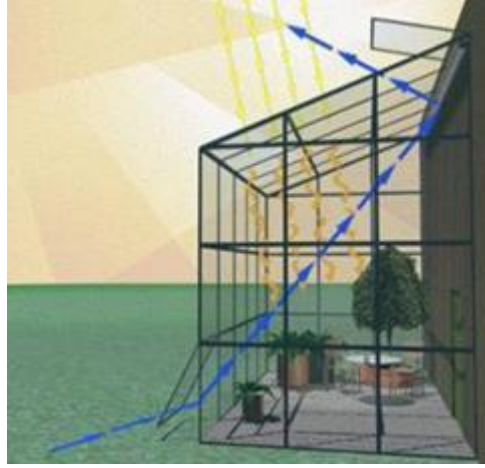
**Şekil 1.28.** Güneş bacası örneği[65]

*Su Arıtma Sistemleri:* Bu sistemler esas olarak sığ bir havuzdan ibarettir. Havuzun üzerine eğimli şeffaf-cam yüzeyler kapatılır. Havuzda buharlaşan su bu kapaklar üzerinde yoğunlaşarak toplanır. Bu tür sistemler, temiz su kaynağının bulunmadığı bazı yerleşim yerlerinde yıllardır kullanılmaktadır. Su arıtma havuzları üzerinde yapılan Ar-Ge çalışmaları ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin azaltılmasına ve verimin artırılmasına yöneliktir[65].



**Şekil 1.29.** Su arıtma sistemi örneği[65]

*Güneş Mimarisi:* Bina yapı ve tasarımında yapılan değişikliklerle ısıtma, aydınlatma ve soğutma gerçekleştirilir. Pasif olarak doğal ısı transfer mekanizmasıyla güneş enerjisi toplanır, depolanır ve dağıtılır. Ayrıca güneş kolektörleri, fotovoltaik modüller vb. aktif ekipmanlar da yararlanılabilir[65].



**Şekil 1.30.** Güneş mimarisi örneği[65]

*Ürün Kurutma ve Seralar:* Güneş enerjisinin tarım alanındaki uygulamalarıdır. Bu tür sistemler ilkel pasif yapıda olabileceği gibi, hava hareketini sağlayan aktif bileşenler de içerebilir. Bu sistemler dünyada kırsal yörelerde sınırlı bir biçimde kullanılmaktadırlar[65].



**Şekil 1.31.** Sera örneği[65]

*Güneş Ocakları:* Çanak şeklinde ya da kutu şeklinde, içi yansıtıcı maddelerle kaplanmış güneş ocaklarında odakta ısı toplanarak yemek pişirmede kullanılır. Bu yöntem, Hindistan, Çin gibi bir kaç ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır[65].



Şekil 1.32. Güneş ocağı örneği[65]

#### 1.7.1.2. Orta Sıcaklık Uygulamaları (100°C-300 °C)

Söz konusu uygulamada, güneş ışınımının yansıtılarak veya kırılarak bir noktaya ya da eksene yoğunlaştırıldığı odaklayıcı toplayıcılar kullanılır. Birçok gelişmiş ülkede güneş enerjisi teknolojilerinde, öncelik çizgisel odaklayan ve güneşi izleyen sistemlere verilmiş durumdadır.

Sözü edilen sistemler büyük soğutma ve ısıtma sistemlerinin yanında sanayi için gerekli olan sıcak su ve buhar temin eden sistemlerdir[121].

#### 1.7.1.3. Yüksek Sıcaklık Uygulamaları (300 °C ve üzeri)

Birçok gelişmiş ülkede güneş enerjisi teknolojilerinde öncelik çizgisel odaklayan ve güneşi izleyen sistemlere verilmiş durumdadır. Tipik çizgisel odaklayıcı, parabolik bir yalak ve bu yalağın odak noktasından geçen bir borudan oluşmaktadır. Parabolik yalak, güneş ışınlarını yüksek verimle odaklayan bir ayna spot sisteminden ibarettir. Odak noktasında bulunan ve içinden ısı transfer akışkanının geçtiği boru ise genellikle saydam ikinci bir boru içinde yer alır. İki boru arası konveksiyon kayıplarını en aza indirmek için vakumlanmıştır. Genellikle kuzey-güney (veya doğu-batı) yönünde yerleştirilen modüller doğu-batı veya (kuzeygüney) yönünde güneşi izlerler ve ısı transfer akışkanının sıcaklığı 350 °C - 400 °C 'ye kadar ulaşabilmektedir. Sıcak akışkan bir ön ısıtıcıdan veya doğrudan bir eşanjörden geçirilerek buhar elde edilmekte ve bu buhar elektrik üretimi amaçlandığı takdirde konvensiyonel bir türbüne yollanmaktadır. Güneş fırınları ve güneşsel güç sistemlerinde yansıtıcı olarak aynalardan yararlanılmakta ve 3500 °C sıcaklığa kadar çıkılabilmektedir.

Fransa ve ABD'de bulunan güneş fırınlarında metallerin eritilmesi, kesilmesi ve kalıplanması yapılmaktadır. Bu uygulamalar; Güneş fırınları, Metal ergitme fırınlarıdır[120].

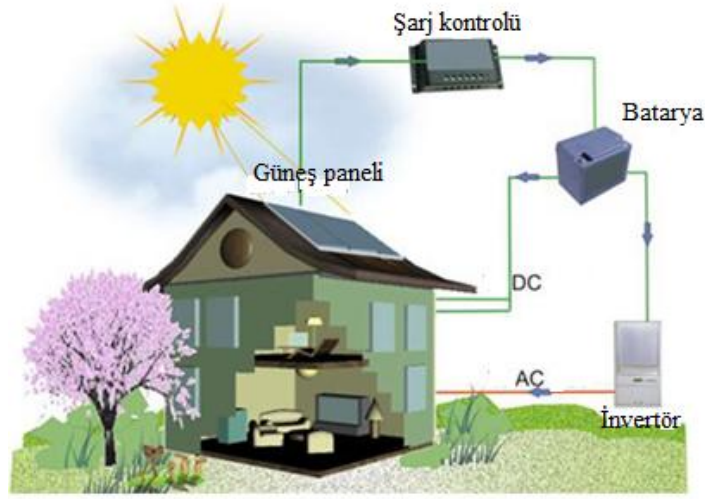
### **1.7.2. Fotovoltaik Uygulamalar**

Güneş hücreleri (fotovoltaik hücreler), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş hücreleri alanları genellikle 100 cm<sup>2</sup> civarında, kalınlıkları ise 0,1- 0,4 mm arasındadır. Güneş hücreleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Hücrenin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına bağlı olarak % 5 ile % 30 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş hücresi birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş hücresi modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç Watt' tan MWatt' lara kadar sistem oluşturulur.

Güneş hücreleri, elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilir. fotovoltaik modüller uygulamaya bağlı olarak, akümülatörler, invertörler, akü şarj denetim aygıtları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir fotovoltaik sistemi oluştururlar. Bu sistemler, geçmiş zamanlarda sadece yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde, jeneratöre yakıt taşımanın zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırken, artık şebeke bağlantısı olan yerleşim yerlerinde de şebeke bağlantılı olarak evlerin çatılarına ve büyük ölçekli santral uygulamalarında da kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Bunun dışında dizel jeneratörler ya da başka güç sistemleri ile birlikte karma olarak kullanılmaları da mümkündür.

Şebekeden bağımsız sistemlerde yeterli sayıda fotovoltaik modül, enerji kaynağı olarak kullanılır. Güneşin yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanılmak üzere genellikle sistemde akümülatör bulundurulur. Fotovoltaik modüller gün boyunca elektrik enerjisi üreterek bunu akümülatörde depolar, yüke gerekli olan enerji akümülatörden alınır. Akünün aşırı şarj ve deşarj olarak zarar görmesini engellemek için kullanılan denetim birimi ise akünün durumuna göre, ya fotovoltaik modüllerden gelen akımı ya da yükün çektiği akımı keser. Şebeke uyumlu alternatif akım elektriğinin gerekli olduğu uygulamalarda, sisteme bir invertör eklenerek akümülatördeki DC gerilim, 220 V, 50 Hz.lik sinüs dalgasına dönüştürülür. Benzer şekilde, uygulamanın şekline göre çeşitli destek elektronik devreler sisteme katılabilir. Bazı sistemlerde, fotovoltaik modüllerin maksimum güç noktasında

alışmasını sağlayan maksimum güç noktası izleyici cihazda bulunur. Aşağıda şekil 2.27’de şebekeden bağımsız bir fotovoltatik sistemin şeması verilmektedir[65].



şekil 1.33. şebekeden bağımsız bir fotovoltatik sistemin şeması[65]

şebeke bağlantılı fotovoltatik sistemler yüksek güçte-satral boyutunda sistemler şeklinde olabileceği gibi daha çok görülen uygulaması binalarda küçük güçlü kullanım şeklinde dir. Bu sistemlerde örneğin bir konutun elektrik gereksinimi karşılanırken, üretilen fazla enerji elektrik şebekesine verilir, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Böyle bir sistemde enerji depolaması yapmaya gerek yoktur, yalnızca üretilen DC elektriğin, AC elektriğe çevrilmesi ve şebeke uyumlu olması yeterlidir. Fotovoltatik sistemlerin şebekeden bağımsız (stand-alone) olarak kullanıldığı tipik uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır:

- Haberleşme istasyonları, kırsal radyo, telsiz ve telefon sistemleri
- Petrol boru hatlarının katodik koruması
- Metal yapıların (köprüler, kuleler vb) korozyondan koruması
- Elektrik ve su dağıtım sistemlerinde yapılan telemetrik ölçümler, hava gözlem istasyonları
- Bina içi ya da dışı aydınlatma
- Dağevleri ya da yerleşim yerlerinden uzaktaki evlerde TV, radyo, buzdolabı gibi elektrikli aygıtların alıştırılması
- Tarımsal sulama ya da ev kullanımı amacıyla su pompajı
- Orman gözetleme kuleleri
- Deniz fenerleri
- İlkyardım, alarm ve güvenlik sistemleri
- Deprem ve hava gözlem istasyonları
- İlaç ve aşı soğutma[65].

### 1.7.3. Güneş Enerjili Sıcak Su Hazırlama Sistemleri

Güneş enerjili sistemlerin içinde en ekonomik ve en yaygın olarak kullanılanların başında sıcak su hazırlama sistemleri gelmektedir. Genellikle, çatının güney yönüne konulan kollektörler ile ısıtım şiddetine bağlı olarak sıcak su ihtiyacının büyük bir kısmı güneş enerjisinden karşılanır. Güneş enerjili sıcak su hazırlama sistemleri ile konut için gerekli olan toplam enerjinin % 12' sini karşılanabilmektedir. Güneş enerjili sıcak su hazırlama sistemleri değişik şekillerde yapılabilmektedir. Güneş enerjili sıcak su sistemlerinin seçimine etki eden değişik faktörler mevcuttur. Genel olarak bir sistemin seçimine ve yerleştirme esaslarına etki eden özellikleri;

- Bölgenin meteorolojik özellikleri
- Gerekli sıcak su miktarı, sıcaklığı ve gün içindeki kullanma saatleri,
- Binanın veya işyerinin sıhhi tesisat donanımı,
- Kollektör yüzey alanının büyüklüğü,
- Şebeke suyunun özellikleri,
- Bina konumu ve mimari projesi, gibi faktörler belirler.

Sistem ve elemanları seçilirken yukarıda belirtilen hususların her birinin ayrı ayrı göz önüne alınması gerekir. Güneş enerjili sıcak su sistemleri en temelde; sirkülasyon şekline göre:

- Tabii(doğal) dolaşımli,
- Zorlanmış dolaşımli (pompalı),

devre şekline göre:

- Açık
- Kapalı sistemler

kollektör tipine göre:

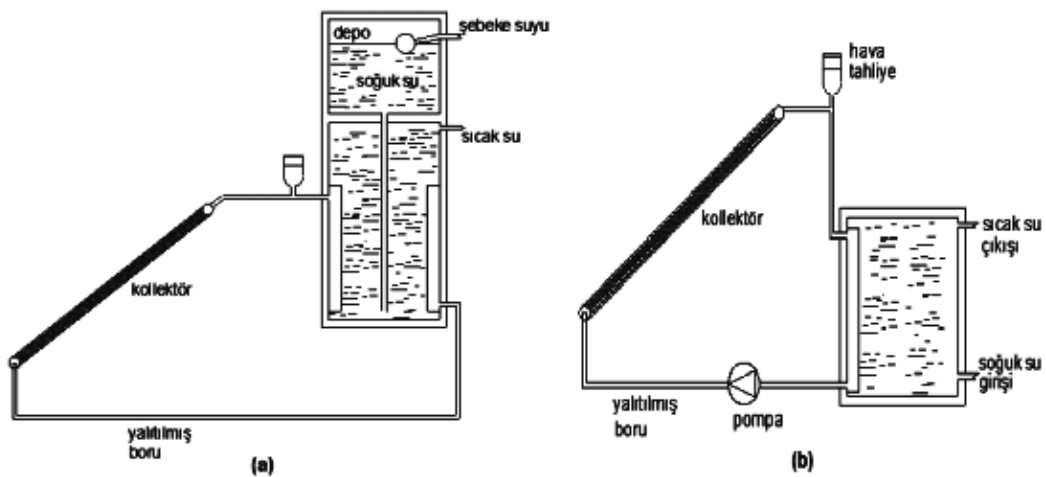
- Düz yüzeyli panel
- Vakum tüplü olarak gruplandırılabilir.

#### 1.7.3.1. Sirkülasyon Şekline Göre Güneş Enerjili Sıcak Su Sistemleri

**a) Tabii (doğal) taşınımli sistemler:** Tabii dolaşımli sistemler ısı transfer akışkanının kendiliğinden dolaştığı sistemlerdir. Kolektörlerde ısınan suyun yoğunluğunun azalması ve yükselmesi özelliğine dayanmaktadır. Bu tür sistemlerde depo kolektörün üst seviyesinden en az 30 cm yukarıda olması gerekmektedir. Deponun alt seviyesinden alınan soğuk (ağır) su kolektörlerde ısınarak hafifler ve deponun üst seviyesine yükselir. Gün boyu devam eden bu

olay sonunda depodaki su ısınmış olur. Su sıcaklıklarında bir eşitlik olduğunda, gece veya güneş olmayan günlerde dolaşım durur, sistem çalışmaz. Tabii dolaşımli sistemler daha çok küçük miktarda su ihtiyaçları için uygulanır. Deponun yukarıda bulunması zorunluluğu nedeniyle büyük sistemlerde uygulanamaz. Pompa ve otomatik kontrol devresi gerektirmediği için pompalı sistemlere göre biraz daha ucuzdur.

**b) Zorlanmış taşınımli (cebri) sistemler:** Isı transfer akışkanının sistemde pompa ile dolaştırıldığı sistemlerdir. Deposunun yukarıda olma zorunluluğu yoktur. Büyük sistemlerde su hatlarındaki direncin artması sonucu tabii dolaşımın olmaması ve büyük bir deponun yukarıda tutulmasının zorluğu nedeniyle pompa kullanma zorunluluğu doğmuştur. Pompalı sistemler otomatik kontrol devresi yardımı ile çalışırlar. Depo tabanına ve kollektör çıkışına yerleştirilen diferansiyel termostatin sensörleri; kollektörlerdeki suyun depodaki sudan  $10^{\circ}\text{C}$  daha sıcak olması durumunda pompayı çalıştırarak sıcak suyu depoya alır, bu fark  $3^{\circ}\text{C}$  olduğunda ise pompayı durdurur. Pompa ve otomatik kontrol devresinin zaman zaman arızalanması nedeniyle işletilmesi tabii dolaşımli sistemlere göre daha zordur. Güneş kollektörlerinde çalışma esnasında güneş ışınlarının bir kısmı cam örtüden yansır, bir kısmı da cam örtüden içeriye salınır. Burada cam örtü olarak farklı dayanım ve yansıtma özelliklerine sahip camlar kullanılır ve kollektörün doğrudan güneş tarafına bakan yüzünü kaplar. Gelen ışınların soğurucu yüzeye ulaşması (absorber) ile yutucu yüzeyin imalat ve kaplama özelliğine göre değişik oranlarda absorbe edilir. Absorbe edilen enerji, dolaşım ve bunların içerisinde kapalı devre olarak dolaşan taşıyıcı akışkan yardımı ile depoya gönderilir. Şekil 1.34.'de tabii ve zorlanmış (cebri) taşınımli sistemler gösterilmiştir[121].



Şekil 1.34. a) Tabii taşınımli sistem b) Zorlanmış (cebri) taşınımli sistem[121]

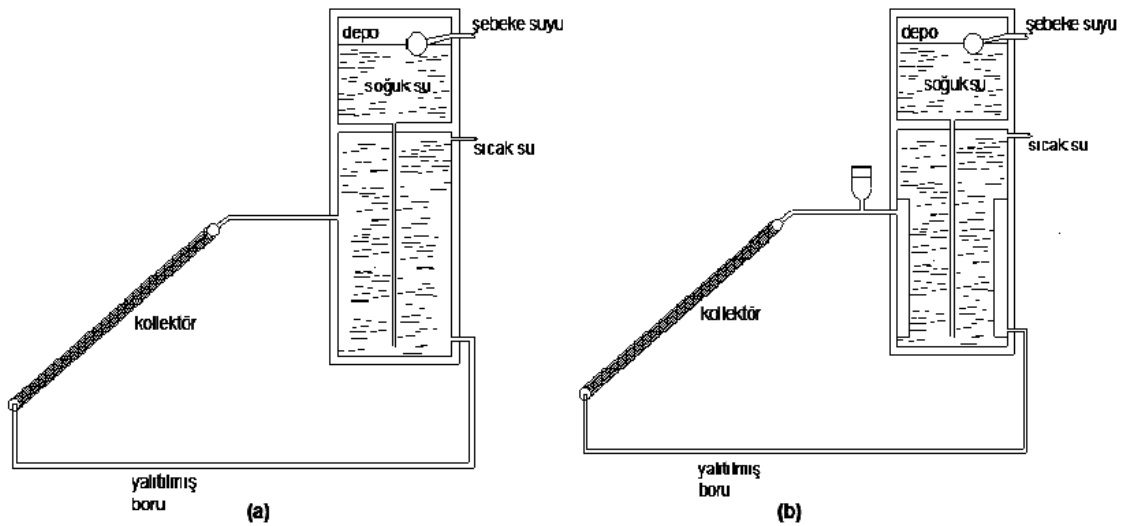
### 1.7.3.2. Devre Şekline Göre Güneş Enerjili Sıcak Su Sistemleri

**a) Açık sistemler:** Açık sistemler kullanım suyu ile kolektörlerde dolaşan suyun aynı olduğu sistemlerdir. Kapalı sistemlere göre verimleri yüksek ve maliyeti düşüktür. Suyu kireçsizdir ve donma problemlerinin olmadığı bölgelerde kullanılır.

**b) Kapalı sistemler:** Kapalı devreli sistemlerde; birbirinden bağımsız çalışan iki ayrı devre bulunmaktadır. Kollektör devresinde bulunan akışkan, güneşten aldığı enerjiyi, şehir şebekesinden gelen kullanım suyuna transfer eder. Kollektör devresinde bulunan akışkan, kış aylarında donma riskinin bulunduğu bölgelerin sıcaklığına bağlı olarak, uygun oranda antifriz ile su karışımından oluşur. Şekil 2.29'da (a) Açık sistem (b) Kapalı sistem gösterilmektedir.

### 1.7.3.3. Kollektör tipine göre güneş enerjili sıcak su sistemleri

Kollektör tipine göre güneş enerjili ısıtma sistemleri düz yüzeyli ve tüp kolektörlü şeklindedir. Bu çalışmada düz yüzeyli kolektörler kullanılmaktadır.



Şekil 1.35. a) Açık sistem b) Kapalı sistem[121]

**a) Vakum tüp kolektörlü sistemler:** Bu sistemlerde, vakumlu cam borular ve gerekirse absorban yüzeyine gelen enerjiyi artırmak için metal ya da cam yansıtıcılar kullanılır. Bunların çıkışları daha yüksek sıcaklıkta olduğu için (100- 120°C ), düzlemsel kolektörlerin kullanıldığı yerlerde ve ayrıca yiyecek dondurma, bina soğutma gibi daha geniş bir yelpazede kullanılabilirler.



Şekil 1.36. Vakum tüplü kolektör ve çalışma şekli[65]

Bu tip kolektörlerin başlıca özellikleri:

- Kolektör her zaman cam tüp grubundan oluşur.
- Tüp içinde yapılan vakum işleme ile konveksiyon ve kondiksyon yolu ile olabilecek ısı kaybı azaltılır.
- Kullanılan camlar vakum nedeniyle oluşan basınç farkına dayanabilecek mukavemettedir.
- Bağlantı borularının tüpe bağlanabilmesi için bir veya iki manifold bulunur.

Vakum tüplü kolektörler ısı transferi metotlarına göre iki temel gruba ayrılırlar.

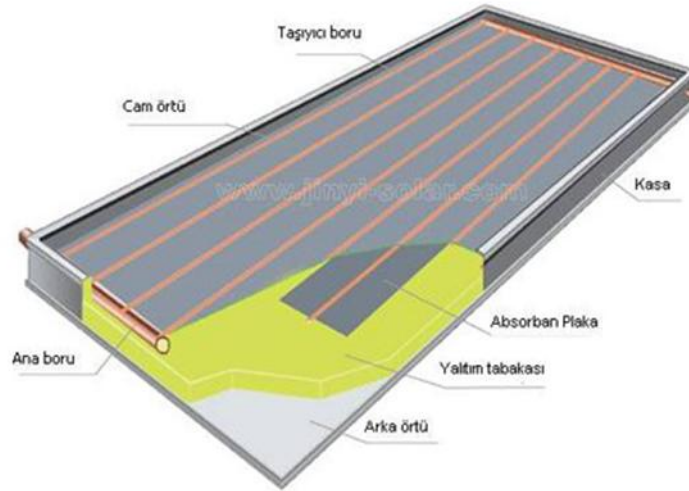
- Isı transferinin borular aracılığıyla direkt akışkana iletildiği sistemler
- Isı borulu sistemler

Isı borulu sistemler güneş kolektörlerinde, yutucu yüzey ısındığında, çalışma ortamı ( su, alkol) buharlaşır. Bu akışkan vakum tüp dışındaki kondensere yükselir ve ısısını transfer ettikten sonra geri akar. Isı borusunun çalışabilmesi için kolektör tüp aksamının en az 20° eğimle yerleştirilmesi gerekir. Isı borulu güneş kolektörünün avantajı ilk çevrimde maksimum durgunluk sıcaklığına ulaşmasıdır. Çalışma ortamına ve basınca bağlı olarak, absorber içeriğinin tümünün buharlaşma sıcaklığına ulaşması mümkündür. Bu sıcaklık 130° - 150°C arasında değişir. Bu nedenle glikol temelli ısı transfer akışkanının bozulma tehlikesi yoktur. ( etilen glikol ve propilen glikol için maksimum çalışma sıcaklığı >170°C)

Tüplü kolektörler direkt dolaşımla 300°C ye kadar yükselen sıcaklıklara ulaşabilir. Bu tip kolektörlerde aşırı ısınmayı önleyecek ek koruma bulunması gereklidir. Evsel sıcak su devrelerinde vakum tüplü kolektörlerin kullanımda, kolektörlerin maksimum sıcaklığını 100°C'de sınırlamak önemlidir.

**b) Düz yüzeyli güneş kolektörleri:** Düzlemsel güneş kolektörleri, güneş enerjisinin toplandığı ve herhangi bir akışkana aktarıldığı çeşitli tür ve biçimlerdeki aygıtlardır. Güneş enerjisinden faydalanmada en yaygın kullanılan düzeneklerdir. Yapımları için karmaşık teknolojiye gerek olmadan diğer sistemlere göre daha ucuzdur. Konutların sıcak su ve ısıtma sistemlerinde, yüzme havuzlarının ısıtılmasında ve endüstri için gerekli su temininde kullanılırlar. Düzlemsel güneş kolektörleri, Şekil 1.37.'de gösterildiği gibi üstten alta doğru, camdan yapılan üst örtü, cam ile absorban plaka arasında yeterince boşluk, kolektörün en önemli parçası olan absorban plaka, arka ve yan yalıtım ve yukarıdaki bölümleri içine alan bir kasadan oluşmuştur[65].

**-Üst Örtü:** Kolektörlerin üstten olan ısı kayıplarını en aza indirgeyen ve güneş ışınlarının geçişini engellemeyen bir maddeden olmalıdır. Cam, güneş ışınlarını geçirilmesi ve ayrıca absorban plakadan yayınlanan uzun dalga boylu ışınları geri yansıtması nedeni ile örtü maddesi olarak son derece uygun bir maddedir. Bilinen pencere camının geçirme katsayısı 0.88'dir. Son zamanlarda özel olarak üretilen düşük demir oksitli camlarda bu değer 0.95 seviyesine ulaşmıştır. Bu tür cam kullanılması verimi %5 mertebesinde artırır.



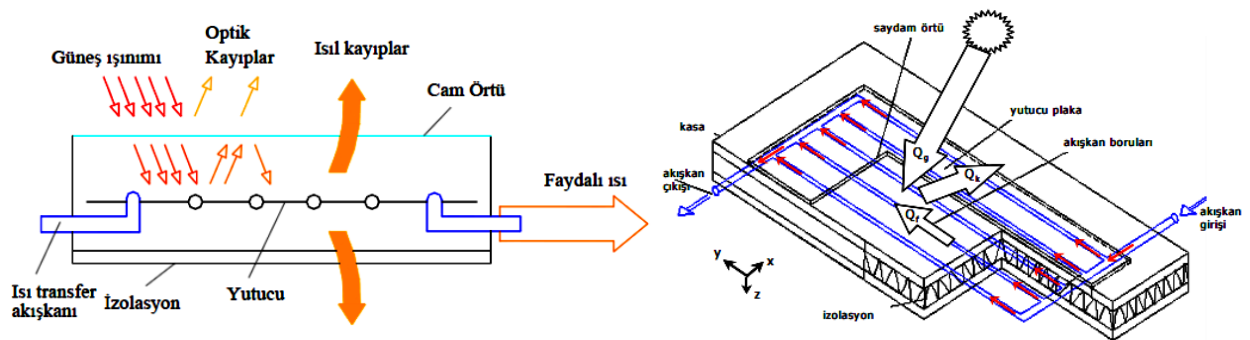
**Şekil 1.37.** Düzlemsel güneş kolektör yapısı[65]

**-Absorban Plaka:** Absorban plaka kolektörün en önemli bölümüdür. Güneş ışınları, absorban plaka tarafından yutularak ısıya dönüştürülür ve sistemde dolaşan sıvıya aktarılır. Absorban plaka, borular ile sıkı temas halinde olmalıdır. Alüminyumda olduğu gibi, akışkan borularının kanatlarla bir bütün teşkil etmesi en iyi durumdur. Bakır ve sacda bu mümkün olmadığı için akışkan boruları ile plakanın birbirine temas problemi ortaya çıkmaktadır. Bu problem ya tamamen ya da belli aralıklarla lehim veya kaynak yapmakla çözülebilir.

- *Yalıtım tabakası:* Kollektörün arkadan olan ısı kayıplarını minimuma indirmek için absorban plaka ile kasa arası uygun bir yalıtım maddesi ile yalıtılmalıdır. Absorban plaka sıcaklığı, kollektörün boş kalması durumunda 150 °C'a kadar ısınması nedeniyle kullanılacak olan yalıtım malzemesinin sıcak yalıtım malzemesi olması gerekmektedir. Isı iletim katsayıları düşük ve soğuk yalıtım malzemesi olarak bilinen poliüretan kökenli yalıtım malzemeleri tek başına kullanılmamalıdır. Bu tür yalıtım malzemeleri, absorban plakaya bakan tarafı sıcak yalıtım malzemesi ile takviye edilerek kullanılmalıdır[65].

-*Akışkan taşıyan borular:* Borular yutucu yüzey üzerine aralıklarla yerleştirilirler. Boruların arasında kalan yutucu yüzey yüzeyleri boruya tutturulmuş kanatlar şeklinde görev yaparlar. Isı, bu kanatlardan borulara, borulardan da içlerindeki sıvıya (genellikle su) aktarılır. Borular arasındaki mesafe arttıkça (kollektörün birim genişliği için kullanılan boru sayısı azaldıkça) kanat verimi dolayısıyla kollektör verimi azalır. Borular arası mesafe küçüldükçe kollektör verimi artar. Bununla beraber sarf edilen malzeme miktarı ve işçilik de fazlalaşır. Optimum kanat uzunluğu, kullanılan boru ve kanat malzemesine, boru çapına, kanat kalınlığına, kollektörün kullanıldığı bölgenin meteorolojik özelliklerine (ışınım şiddeti, çevre sıcaklığı, güneşlenme süresi vs.) kollektörün kullanılacağı sistemin özelliklerine, (sirkülasyon tipi, depo büyüklüğü, akışkan tipi vs.) bağlı olarak değişir. Ayrıca kanat geometrisinin de optimum kanat uzunluğuna etkisi büyüktür.

**Düz Yüzeyli Güneş Kollektörlerinin Isıl Analizi;** Düz yüzeyli güneş kollektörü, Şekil 1.38.' de ısı akış şemaları gösterildiği üzere, prensipte üzerine düşen güneş ışınlam enerjisini, akışkana faydalı ısı enerjisi şeklinde aktaran bir ısı değiştiricisidir[122].



**Şekil 1.38.** Düz yüzeyli güneş kollektörü ısı akış şemaları[122]

Kollektör, bir kontrol hacmi olarak ele alınırsa, öncelikle, kollektör üzerine gelen güneş ışınlamının bir kısmı saydam örtüde yansır ve saydam örtüyü geçen kısmı yutucu plakaya ulaşır. Yansıtılan kısım kollektör optik verimi [yutma–geçirme katsayısı, ( $\tau\alpha$ )] ile ifade edilir. Yutucu plakaya gelen ışınlam enerjisi ( $Q_g$ ), siyah plaka yüzeyi tarafından yutulur ve plakanın

sıcaklığı artar. Yüksek sıcaklıktaki plakadan; ısı, iletim yoluyla borulara ve boru iç yüzeyinden taşınım ile akışkana faydalı ısı enerjisi ( $Q_f$ ) olarak aktarılır. Bu esnada, sıcaklığı artan yutucu plakadan düşük sıcaklıktaki çevreye ışınlım ve taşınım yolu ile ısı kayıpları ( $Q_k$ ) olmaktadır. Eğer, ısı olarak sürekli rejime ulaşılmamış ise, kollektör ısı ataletine bağlı olarak kollektörün ısınması veya soğuması şeklinde bir miktar depolama da ( $Q_d$ ) olabilecektir. O halde, kollektör üzerine gelen güneş ışınlım enerjisi sürekli rejimde ya suya aktarılmakta ya da çevreye kaybolmaktadır. Bu durumda, kollektör bir kontrol hacmi olarak değerlendirilip kollektörün tamamı için anlık enerji korunumu uygulanarak aşağıdaki eşitlik (1.16) elde edilir:

$$Q_g = A_t I_e = Q_f + Q_k + Q_d \quad (1.16)$$

Burada;

$A_t$  : Kollektör yüzey alanı ( $m^2$ )

$I_e$  : Kollektör üzerine gelen anlık güneş ışınlımı ( $W/m^2$ )

$Q_g$  : Yutucu plakaya gelen ışınlım enerjisi (W)

$Q_f$  : Akışkana aktarılan faydalı enerji (W)

$Q_d$  : Depolanan enerji (W)

$Q_k$  : Toplam ısı kaybı (W)

şeklindeir. Bu fiziksel büyüklüklerin hesaplanması aşağıda açıklanmıştır:

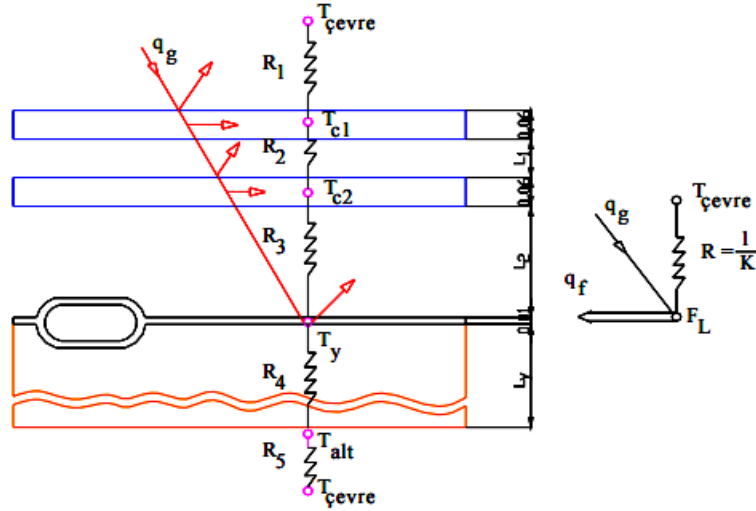
*-Kollektör üzerine gelen anlık güneş ışınlımı ( $I_e$ ):* Birçok astronomik, geometrik ve coğrafik parametrenin fonksiyonudur ve yılın her günü ve günün her anı için farklıdır. Bu ışınlım, ışınlım ölçen cihazlarla belirlenebileceği gibi, yarı ampirik denklemlerle de hesaplanabilir.

*-Akışkana aktarılan faydalı enerji  $Q_f$  :* Kollektörden akışkan aktarılan faydalı enerji miktarı, suyun kollektöre giriş ( $T_g$ ) ve çıkış sıcaklığı ( $T_c$ ) ile debisinin deneysel olarak belirlenmesi durumunda aşağıdaki eşitlik (17) ile hesaplanabilir.

$$Q_f = \dot{m} c_p (T_c - T_g) = \rho \dot{Q} c_p (T_c - T_g) \quad (1.17)$$

*-Depolanan enerji ( $Q_d$ ):* Kollektör sürekli rejimde değilken ısınması ve soğuması esnasındaki ısı ataletinden kaynaklanmaktadır ve miktarı, kayıp ve faydalı enerjiye göre genellikle ihmal edilebilecek seviyelerdedir.

-*Kayıp enerji ( $Q_k$ )*: Kollektörde meydana gelen ısı kayıpları, kollektör geometrisinin yanı sıra, çevre sıcaklığı, rüzgar hızı, saydam örtü sayısı ve özellikleri, yalıtım şekli ve yalıtım malzemesi özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Çift saydam örtülü bir kollektör için ısı kaybının elektrik benzeşimi Şekil 1.39’da görülmektedir[122].



Şekil 1.39. Düz kollektörlerde ısı geçişinin elektrik benzeşimi[122]

Düz kollektörlerde, çevreye olan ısı kaybı, kollektörlerin üst, alt ve yan yüzeylerinden olur. Kollektör yan yüzey alanları küçük olduğundan genelde kayıp hesaplarına katılmaz. Yutucu plaka ile çevre arasındaki toplam ısı kayıp katsayısı ( $K$ ), kollektör alt yüzeyinden ( $K_{alt}$ ) ve üst yüzeyinden ( $K_{üst}$ ) olan ısı kayıp katsayılarının toplamıdır ve aşağıdaki eşitlik (1.18) ile ifade edilir.

$$K = K_{alt} + K_{üst} \quad (1.18)$$

Kollektörlerin alt yüzeyinden olan ısı kaybı, yalıtım malzemesinin kalınlığı ile ısı iletim katsayısına ve çevreye taşınım ile olan ısı geçişine bağlıdır. Şekil 1.39.’daki ısı dirençleri ( $R$ ) cinsinden, kollektörün alt yüzeyinden gerçekleşen toplam ısı katsayısı,

$$K_{alt} = \frac{1}{R_4 + R_5} \quad (1.19)$$

şeklindedir. Burada ( $R_4$ ) ısı direnci; yalıtım kalınlığı ( $L_y$ ) ve ısı iletim katsayısı ( $k_y$ ) cinsinden

$$R_4 = \frac{L_y}{k_y} \quad (1.20)$$

denklemleriyle hesaplanır. Yalıtım malzemesinin alt yüzey sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki fark çok küçük gerçekleştiğinden ( $R_5=0$ ) alınabilir. Bu durumda kollektör alt yüzeyinden olan ısı kayıp katsayısı için,

$$K_{alt} = \frac{k_y}{L_y} \quad (1.21)$$

denklemleri elde edilir.

-*Kollektör üst yüzeyinden olan ısı kayıp katsayısı ( $K_{üst}$ ):* Kollektör üst yüzeyinden olan ısı kaybı hesabı; iletim, taşınım ve ışıının dahil olduğu oldukça detaylı ısı analiz yapılmasını gerektirir. Benzer şekilde, ( $K_{üst}$ ) ısı dirençler cinsinden kapalı formda aşağıdaki eşitlik (1.22) ile ifade edilir.

$$\frac{1}{K_{üst}} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} \quad (1.22)$$

Kollektörün üst kısmındaki ısı kayıp katsayısı; levha, saydam örtü ve çevre sıcaklıkları, saydam örtü sayısı, yutucu plaka ile saydam örtü arasındaki mesafe, yutucu plakanın ışıının neşretme katsayısı, rüzgar hızı vb. gibi birçok parametreye bağlıdır.

Anlık kollektör verimi, yüzeye gelen güneş ışıının, faydalı enerji olarak akışkana aktarılma oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki eşitlik (1.23) ile ifade edilir [122].

$$\eta_t = \frac{Q_f}{Q_g} = \frac{m c_p (T_f - T_g)}{A_t I_e} = \frac{\rho Q c_p (T_f - T_g)}{A_t I_e} \quad (1.23)$$

Bu tezin amacı ise; farklı hacimsel oranlarda, uzun süre stabil ve kararlılığını koruyabilen nanoakışkanlar hazırlamak, nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini belirlemek ve bu nanoakışkanları düzlemsel kollektörlü güneş enerji su ısıtma sisteminde kullanarak ısı verim ve performans üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Tüm deneyler, düzlemsel kollektör ile tasarlanan iki adet sistemde eş zamanlı olarak yapılmıştır. Öncelikle farklı nanopartikül konsantrasyonunda hazırlanan nanoakışkanlarla elde edilen sonuçlar birbirleriyle ve temel akışkan olan saf su ile elde edilen sonuçlarla, daha sonra her bir hacimsel oran için farklı debi değerlerinde elde edilen sonuçlar, ısı transfer karakteristikleri ve ısı verim açısından karşılaştırılacaktır.

## 2.MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışma, nanoakışkanların sentezlenmesi, nanoakışkanın bazı fiziksel ve ısı özelliklerinin (ısı iletkenlik, viskozite gibi) belirlenmesi ve ısı performansının ya da veriminin düzlemsel güneş kolektörlerinde test edilmesi olmak üzere üç aşamayı kapsamaktadır. Bu aşamalardan nanoakışkanların sentezlenmesinde kullanılacak yöntem iki adım yöntemidir. Nanopartiküllerin hacim yüzdeleri belirlendikten sonra temel akışkan olarak kullanılan suya belirlenen hacim oranlarında karıştırılmıştır.

Deneysel materyaller, nanoakışkanların hazırlanması ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi aşamasında kullanılan materyeller olmak üzere iki başlık altında incelenmiştir.

### 2.1. Nanoakışkanları Hazırlanması Aşamasında Kullanılan Deneysel Materyeller

#### 2.1.1. Nanopartiküller

Deneylerde kullanılan  $Al_2O_3$ , CuO ve  $TiO_2$  nanopartikülleri Sigma-Aldrich firmasından satın alınmış ve nanopartiküllerin özellikleri Tablo 2.1’ de verilmiştir.

**Tablo 2.1.** Çalışmada kullanılan nanopartiküllerin özellikleri

| Partikül Adı    | Moleküler Formülü | Molekül Ağırlığı | Fazı   | Partikül Boyutu | Yüzey Alanı   | Erime noktası | Isıl İletkenliği |
|-----------------|-------------------|------------------|--------|-----------------|---------------|---------------|------------------|
| Alumina         | $Al_2O_3$         | 101.96 g/mol     | Gama   | < 50nm          | 35-43 $m^2/g$ | 2040°C        | 37.14 W/mK       |
| Bakıroksit      | CuO               | 79.55 g/mol      | -      | < 50nm          | 29 $m^2/g$    | 1326°C        | 76.5 W/mK        |
| Titanyumdioksit | $TiO_2$           | 79.86 g/mol      | Anataz | < 25nm          | 45-55 $m^2/g$ | 1825°C        | 21.9 W/mK        |

#### 2.1.2. Hassas Terazi

Nanoakışkan hazırlanırken, hacimsel oran olarak belirli olan nanopartikül miktarı kütleye çevrilerek saf su içerisine katılmıştır. Nanopartikül ölçümünde 0,0001 g hassasiyetinde ve maximum 252 g ölçme kapasiteli AND marka HR250AZ model hassas terazi kullanılmıştır.



**Şekil 2.1.** Hassas terazi

### **2.1.3. Ultrasonik Karıştırıcı**

Nanoakışkanlar hazırlanırken oluşabilecek topaklanmayı engellemek ve nanoakışkanın stabilitesini artırmak için Erzurum Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Laboratuvarı' ndaki HIELSCHER Marka UP400S Model Ultrasonik Homojenizatör kullanılmıştır. Nanoakışkan hazırlanırken ısınmasını engellemek için 2 L kapasiteli reaktör kullanılmıştır.



**Şekil 2.2.** Ultrasonik karıştırıcı

#### 2.1.4. Ultrasonik Banyo

Nanoakışkanlarda topaklanmayı engellemek ve stabiliteyi artırmak için ultrasonik homojenizatör ile birlikte Fırat Üniversitesi Biyoloji Bölümü Laboratuvarı'ndaki ultrasonik banyo da kullanılmıştır. Ultrasonik banyonun; voltajı 230 V- 60 Hz, ultrasonik gücü 320 peak/80 Watt, ısıtıcı gücü: 200 Watt, ultrasonik frekansı ise 37 kHz'dir.



Şekil 2.3. Ultrasonik banyo

## 2.2. Nanoakışkanları Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Materyeller

### 2.2.1. Isıl İletkenlik Ölçer

Isıl iletkenlik ölçümleri Fırat Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Laboratuvar'ındaki Decagon firması tarafından üretilen KD2 Pro Thermal Analyzer isimli cihazla yapıldı.



Şekil 2.4. KD2 Pro cihazı

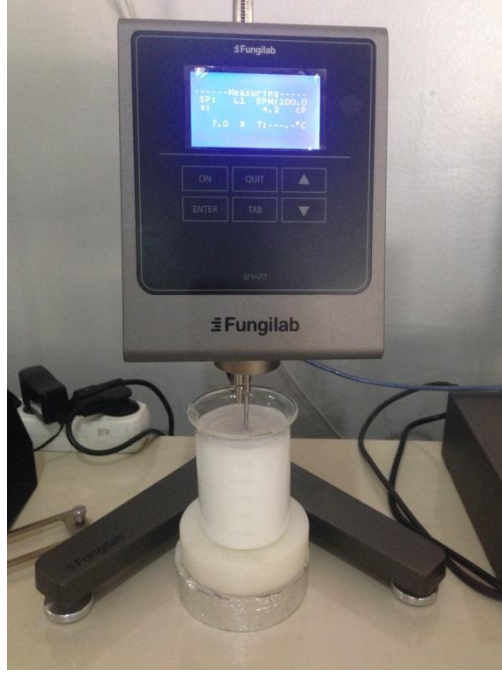
KD2 Pro geçici sıcak tel metodu kullanarak ölçüm yapan bir cihazdır. Akışkan içerisine daldırılmış olan prob tarafından ısıtma ve soğutma sırasında birer saniye aralıklarla sıcaklık ölçümü yapılmaktadır. Daha sonra elde edilen ölçümler nonlineer en küçük kareler prosedürü kullanılarak exponansiyel integral fonksiyonlarına uygun olarak yapılır. Okumaların hassasiyetini optimize edebilmek amacıyla ölçümler sırasında akışkanın sıcaklık değişimleri için bir lineer sapma terimi ile düzeltme yapılmaktadır. Tüm bu işlemler cihazın çalışma prensibi doğrultusunda ölçümler sırasında cihaz tarafından yapılmaktadır. KD2 Pro cihazının teknik özellikleri Tablo 2.2’ de ve resmi Şekil 2.4’te verilmiştir.

**Tablo 2.2.** KD2 Pro Isıl özellik ölçerin teknik özellikleri

| <b>ÖZELLİKLER</b>   |                                              |
|---------------------|----------------------------------------------|
| Ölçüm Hassasiyeti   | Isıl Difüzivite: %10                         |
|                     | Isıl Direnç: %10                             |
|                     | Özgül Isı: %10                               |
|                     | Isıl İletkenlik: %5                          |
| Veri Hafızası       | 4095 Okuma (Flash Memory)                    |
| Ölçüm Sıcaklığı     | -50 ile +150°C                               |
| Ölçüm Aralığı       | K: 0.02 – 2 Wm <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> |
|                     | D: 0.1 – 1.0 mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> |
|                     | R: 0.5 – 50 mCW <sup>-1</sup>                |
|                     | C: 0.5 – 4 MJm <sup>-3</sup> C <sup>-1</sup> |
| Ölçüm Parametreleri | Isıl Difüzivite, D                           |
|                     | Özgül Isı, C                                 |
|                     | Isıl İletkenlik, K                           |
|                     | Isıl Direnç, R                               |
| Sensörler           | KS-1: Isıl Direnç/Isıl İletkenlik            |
|                     | TR-1: Isıl Direnç/Isıl İletkenlik            |
|                     | SH-1: Isıl Difüzivite /Özgül Isı             |
|                     | KS-1: Isıl Direnç/Isıl İletkenlik            |
| Ölçüm Süresi        | 90 saniye                                    |

### 2.2.2. Viskozimetre

Hazırlanan nanoakışkanların viskozitesi Şekil 2.5.’te verilen Fırat Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Laboratuvar’ındaki FUNGILAB marka Smart serisi modeli viskozimetre ile ölçülmüştür. Yapılan viskozite ölçümleri mevcut modellerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.5. Viskoizimetre

### 2.3. Deney Düzenegi

Tasarlanan deney düzenegi Şekil 2.6.'da verildiği gibi Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Isı Tekniği Laboratuvarı terasında, tesisatı gölgelenmeye maruz kalmayacak şekilde güneğe dönük monte edilmiştir. Deneyler 2015 yılının Mayıs-Ağustos ayları arasında Elazığ iklim koşullarında yapılmıştır (38° 40' 51" K enlem, 39° 13' 25" D boylam)



Şekil 2.6. Deney düzenegi



### 2.3.1. Düzlemsel Güneş Kollektörleri

Deneyler için Şekil 2.8.'de verilen 940x2000x95 mm ölçülerinde brüt 1.8 m<sup>2</sup> net 1.5 m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip alüminyum borulu, kanatlı, siyah boyalı ve düz yüzeyli güneş enerjili standart sıcak su kollektörü kullanılmıştır.



Şekil 2.8. Düz yüzeyli güneş kollektörü

Elazığ ili için optimum kollektör eğim açısı aşağıda verilen Eşitlik 2.1 ile hesaplanmıştır[123]:

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (2.1)$$

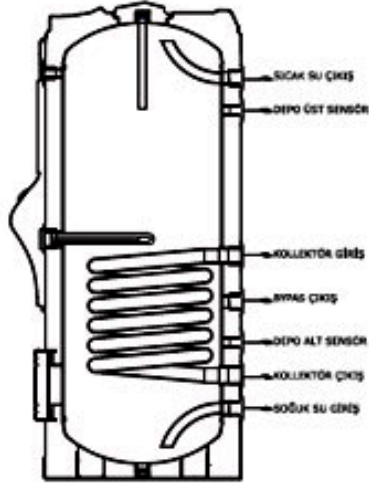
Eşitlikteki  $\phi$  enlemi,  $n$  gün sayısını,  $\delta$  ise aşağıdaki Eşitlik 2.2' i ifade etmektedir:

$$\delta = 23 / 45 \sin(360 \frac{n + 284}{365}) \quad (2.2)$$

Buna göre Elazığ ili için optimum kollektör eğim açısı 35° olarak bulunmuş ve kollektörler bu açıya göre yerleştirilmiştir.

### 2.3.2. Boyler

Deney düzeneğinde sıcak suyu depolamak ve kollektörden gelen ısıyı kullanım suyuna aktarmak üzere kullanılan dış çapı 46 cm yüksekliği 120 cm olan Şekil 2.9.' da iç kesiti verilen tek serpantinli boyler kullanılmıştır.



Şekil 2.9. Tek serpantinli boyler ve iç kesiti

### 2.3.3. Sirkülasyon Pompası

Sistemde suyun dolaşımını sağlamak amacıyla Şekil 2.10.'da verilen WELKO marka LRS40 4S/130 tip sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Kullanılan pompa  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  arası su sıcaklıklarında ve 10 bar işletme basınçlarına kadar kullanılabilmekte, ayarlanabilen üç hız kademesi bulunmakta olup, maksimum basma yüksekliği 4 m'dir. Bu çalışmada pompanın enerjisi fotovoltaik pilden sağlanmaktadır.



Şekil 2.10. Sirkülasyon pompası

### 2.3.4. Fotovoltaik Pil

Sistemde kullanılan sirkülasyon pompasının enerjisini sağlamak amacıyla invertör bağlantısıyla birlikte Şekil 2.11.'de verilen MAX marka SL80TU-18P tip fotovoltaik pil kullanılmıştır. 905x668x35 mm ölçülerindeki bir panelden 80 W enerji elde edilmektedir.



Şekil 2.11. Fotovoltaik pil

### 2.3.5. Debimetre

Nanoakışkanın kullanıldığı sistemde nanoakışkan debisini ölçmek için Şekil 2.12.a'da verilen Gentek firması tarafından üretilen elektromanyetik debimetre kullanılmıştır. Döner eleman içermediği için bu çeşit bir debimetre ile akış alanına müdahale etmeden doğrudan ölçüm yapılabilmekte ve partikül birikmesinden kaçınılabilmektedir. Suyun kullanıldığı diğer sistemde ise Şekil 2.12.b'de verilen 0-200 lt/h aralıklarında ölçüm yapabilen debimetre ile ölçüm yapılmıştır. Her iki debimetre için gerekli kalibrasyonlar yapılmıştır.



a)



b)

Şekil 2.12. a) Elektromanyetik debimetre b) Debimetre

### 2.3.6. Isıl Çiftler

Sıcak ve soğuk akışkanın (nanoakışkanın) kollektörlere giriş ve çıkış sıcaklıklarını belirlemek için; yanmaya, kimyasallara ve aşınmaya direnci yüksek K tipi fiberglas örgülü ısıl çiftler kullanılmıştır. Termoelemanlar sisteme bağlanmadan önce kalibre edilmiştir.

## 2.4. Deneylerde Kullanılan Ölçme Cihazları

### 2.4.1. Sıcaklık Veri Kayıt Cihazı

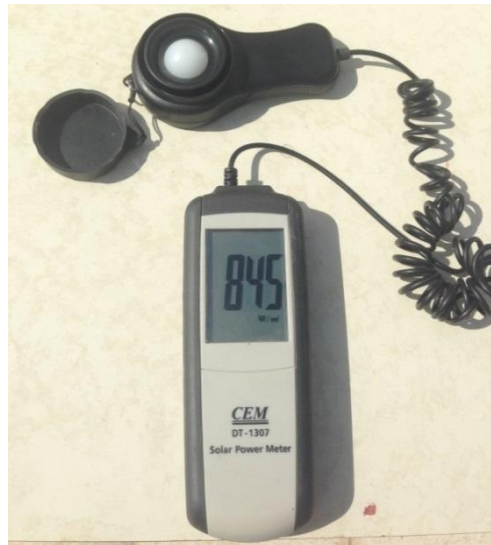
Isıl çiftlerle bağlantılı olarak alınan sıcaklık verileri Şekil 2.13’de verilen TESTO marka 176 T4 model 4 kanallı sıcaklık veri kayıt cihazı ile kaydedilmiştir.



Şekil 2.13. Sıcaklık veri kayıt cihazı

### 2.4.2. Piranometre

Yapılan deneylerde güneş ışınım şiddetinin ölçümünde Şekil 2.14.’de gösterilen CEM marka DT 1307 model piranometre kullanılmıştır. Kullanılan piranometre sistemin çalışma açısına uygun bir eğimle yerleştirilmiş ve 30 dakikalık zaman dilimleri arasında ölçümler yapılmıştır.



Şekil 2.14. Piranometre

### 2.4.3. Termo Higrometre

Havanın sıcaklık ve nemini ölçmede Şekil 2.15’te verilen KANE-MAY marka KM 8004 model dijital Termo Higrometre yardımıyla havanın nem ve sıcaklık değişimleri tespit edilmiştir.



Şekil 2.15. Termo Higrometre

### 2.4.4. Anemometre

Hava hızının ölçümünde Şekil 2.16’da verilen WALLAC marka GGA23F model anemometre yardımıyla hava hızı değişimleri tespit edilmiştir.



Şekil 2.16. Anemometre

## 2.5. Verilerin Hesaplanması ve Değerlendirilmesi

Yapılan deneyler genel olarak 4 başlık altında incelenebilir.

- Nanoakışkanların hazırlanması
- Nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi
- Farklı hacimsel oranlarda ve farklı debilerde deneylerin yapılması
- Elde edilen verilerle düzlemsel güneş kolektör veriminin hesaplanması

### 2.5.1. Nanoakışkanların Hazırlanması

Üç farklı nanopartikül temel akışkan içerisine % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 olmak üzere üç farklı hacimsel oranda eklenmiş, iki adım metodu kullanılarak nanoakışkan hazırlanmıştır. Nanoakışkana eklenecek olan nanopartikülün kütlesi aşağıdaki eşitliklerden yararlanarak hesaplanmıştır.

$$\phi = \frac{\rho_n - \rho_l}{\rho_p - \rho_l} \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.3' de  $\phi$  hacimsel oran, partikülün ve akışkanın yoğunluk değerleri  $\rho_p$  ve  $\rho_l$  sırasıyla yerine yazılarak nanoakışkanın yoğunluğu  $\rho_n$  hesaplanır.

$$\rho_n = \frac{m_n}{V_n} \quad (2.4)$$

$c_m$  Eşitlik 2.5' te yerine yazılarak süspansiyon içindeki nanopartikül kütlesi  $m_p$  hesaplanmıştır.

$$c_m = \phi \frac{\rho_p}{\rho_n} \quad (2.5)$$

$$m_p = c_m m_n \quad (2.6)$$

$m_p$  Eşitlik 2.6' da yerine yazılarak nanoakışkan hazırlanırken kullanılacak olan temel akışkanın kütlesi, hesaplanan  $m_{su}$  değeri Eşitlik 2.7'de yerine yazılarak temel akışkanın hacmi hesaplanmıştır.

$$m_{su} = m_n - m_p \quad (2.7)$$

$$\rho_{su} = \frac{m_{su}}{V_{su}} \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.6'dan kütlesi belirlenen naopartiküller hassas teraziyle tartılarak, Eşitlik 2.8'den hacmi belirlenen temel akışkan içerisine eklenerek iki adım metoduyla nanoakışkan hazırlanmıştır. Deneylerde nanopartikül olarak  $Al_2O_3$ ,  $CuO$  ve  $TiO_2$ ; temel akışkan olarak ise saf su kullanılmıştır. Her bir deneyde kullanılmak üzere, toplam hacmi 5000 mL olan nanoakışkan 1000 hacimli kaplarda beş eşit hacme bölünerek, zamanla çökme ve topaklanma olmaması için homojenizatör ve ultrasonik banyoda hazırlanmıştır. Hazırlanan nanoakışkanlar direkt olarak deney düzeneğindeki düzlemsel güneş kollektörü içerisine boşaltılarak deney aşamasına geçilmiştir. Nanoakışkan hazırlanırken, bu işlemler 3 farklı nanopartikül, 3 farklı hacimsel oran ve 3 farklı debi değeri için de tekrarlanmıştır.

## **2.5.2. Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi**

### **2.5.2.1. Isıl İletkenliğin Belirlenmesi**

Geçici sıcak tel yöntemi nanoakışkanın ısı iletkenliğinin ölçümünde kullanılan en yaygın metottur. Nanoakışkanların ısı özellikleri bu metot ile çalışan KD2 Pro kullanılarak yapılmıştır. Isı kaynağı taşıyıcı bir hattan oluşan bir sistemdir. Tek iğneli sensör akışkan numuneye batırılmaktadır. İlk okuma 2 dakikada olup, 90 sn sıcaklık stabilitesi ayarlanmaktadır. 30 sn de ısınan probun akım miktarı düzenlenmekte, ölçüm yapılmaktadır. Prob içindeki veriyi saklarken sıcaklık değişimini ölçen bir termistör içermektedir. Oda sıcaklığında ısı iletken oluşumu, bir test tüpünün içine konulan akışkan numune yerleştirilmiştir. Prob akışkan tüpe yerleştirilmiş ve akışkanların ısı iletkenlik ölçümü alınmıştır. Ölçüm sonuçları, literatürde sıkça yararlanılan, ölçüm sonuçlarına yakın sonuçların elde edildiği Maxwell, Bruggeman ve Lu-Lin modelleri ile karşılaştırılmıştır. Bu modellere ait eşitlikler önceki bölümdeki Tablo 1.2' de detaylı olarak verilmiştir.

### **2.5.2.2. Viskozitenin Belirlenmesi**

Fungilab marka viskozimetre cihazı ile ölçümler alınmıştır. Ölçümlerden sonra deneysel veriler önceki bölümdeki Tablo 1.3' te detaylı olarak verilen modellerle karşılaştırılmıştır. Ölçüm sonuçları Einstein, Batchelor, Pak ve Cho ve Brinkman modelleri ile karşılaştırılmıştır.

## **2.5.3. Kollektör Veriminin Hesaplanması**

Kollektör verimi; başlıca kollektöre giren ve çıkan akışkan sıcaklıklarına, kollektör üzerine gelen güneş ışınımı şiddetine, çevre ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı, nemi gibi parametrelere bağlı olarak gün içinde değişiklik gösterdiklerinden dolayı kollektör verimleri,

kollektör verim eğrisi ile akışkan giriş, çıkış ve ortalama sıcaklık değerlerinin fonksiyonu olarak grafiksel biçimde gösterilmelidir.

Farklı ülkelerde güneş kollektörlerinin verim deneylerini kapsayan farklı standartlar bulunmaktadır. Bu amaçla geliştirilen bazı standartlar aşağıda verilmiştir[124]:

- ISO 9060:1990 “Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation”
- ISO 9806-1:1994 “Test methods for solar collectors – Part 1: Thermal performance of glazed liquid heating collectors including pressure drop”
- ISO 9806-2: 1995 “Test methods for solar collectors – Part 2: Qualification test procedures”
- ISO 9806-3: 1995 “Test methods for solar collectors - Part 3: Thermal performance of unglazed liquid heating collectors (sensible heat transfer only) including pressure drop”
- ISO 9846: 1993 “Solar energy - Calibration of a pyranometer using a pyrliometer”
- ISO 9847:1992 “Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer”
- ISO/TR 9901:1990 “Solar energy - Field pyranometers - Recommended practice for use”
- EN ISO 9488:2000 “Solar Energy - Vocabulary (ISO 9488:1999)”
- ANSI/ASHRAE 96-1980 (RA 1989) “Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Unglazed Flat-Plate Liquid-Type Solar Collectors”
- ANSI/ASHRAE 93-2003 “Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors”
- DIN EN 12975-1 (2001-03) “Thermal Solar Systems and Components-Solar collectors-Part1: General requirements”
- DIN EN 12975-2 (2001) “Thermal Solar Systems and Components-Solar collectors-Part2: Test Methods”
- TS 3680-1:2003 “Isıl Güneş Enerji Sistemleri ve Bileşenleri-Güneş Enerjisi Kollektörleri-Bölüm 1: Genel Kurallar”
- TS 3680-2:2003 “Isıl Güneş Enerji Sistemleri ve Bileşenleri-Güneş Enerjisi Kollektörleri-Bölüm 2: Deney Metotları”

Türkiye’de TS 3680-1 ve TS 3680-2 standartları sıvı akışkanlı güneş kollektörlerinin ısı veriminin saptanmasında kullanılmaktadır. Bu standartlar AB standardı olan DIN EN 12975-1 ve DIN EN 12975- 2 standartlarının içeriğini kapsamaktadır. Bu çalışmada kollektör ısı veriminin saptanmasında ASHRAE 93-2003 standartından yararlanılmıştır.

Kararlı hal koşulları altında çalışan bir güneş kolektörünün anlık enerji verimi, kolektörden alınan yararlı ısının kolektör tarafından alınan güneş enerjisine oranı olarak tanımlanır. Kolektörden alınan yararlı ısı akışkan giriş sıcaklığına göre aşağıdaki Eşitlik 2.9 ve 2.10' dan hesaplanmaktadır[125]:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_g - T_g) \quad (2.9)$$

$$Q_u = A_c F_R [G_T - U_L (T_g - T_o)] \quad (2.10)$$

Burada,  $C_p$  özgül ısı,  $\phi$  hacimsel oran,  $C_{p,np}$   $Al_2O_3$ ,  $CuO$  ve  $TiO_2$  için sırasıyla 880, 530.5 ve 692 j/kg K ve  $C_{p,bf}$  saf su için 4182 j/kg K olarak alınmıştır. Eşitlik 2.12'e göre her bir hacimsel oran için  $C_{p,nf}$  değerleri hesaplanmıştır.

$$C_{p,nf} = C_{p,np}(\phi) + C_{p,bf}(1 - \phi) \quad (2.11)$$

Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığının kullanılması durumunda kolektör verim ifadesi aşağıdaki Eşitlik 2.12 ve 2.13 ile tanımlanır:

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} = \frac{\dot{m}C_p(T_g - T_g)}{G_T} \quad (2.12)$$

$$\eta_i = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{T_g - T_o}{G_T} \quad (2.13)$$

Isı transfer akışkanının ortalama sıcaklığının kullanılması durumunda kolektör verim ifadesi Eşitlik 2.14 ile tanımlanır.

$$\eta_i = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{T_g - T_o}{G_T} \quad (2.14)$$

#### 2.5.4. Hata Analizi

Deneysel hataları genel olarak üç grupta toplamak mümkündür. Bunlardan birinci gruptakiler dikkatsizlik ve tecrübesizlikten kaynaklanan hatalardır. Ölçme cihazlarının yanlış seçiminden ve ölçme sistemlerinin yanlış dizaynından ortaya çıkan hatalar bu grup içinde düşünülür. Bu hatalar genellikle ölçülen diğer bulgulardan farklı karakterde olduğundan, tecrübeli bir araştırmacı tarafından bunlar kolaylıkla tespit edilerek, değerlendirme dışı bırakılabilir.

İkinci grup hatalar sabit ve sistematik olarak adlandırılan hatalardır. Bunlarda genel olarak tekrar edilen okumalarda görülen ve nedenleri çoğunlukla bilinmeyen hatalardır.

Üçüncü grup hatalar ise rastgele hatalardır. Bunlar ise deneyi yapan elemanların değişmesinden, deneyi yapanların dikkatlerinin zamanla azalmasından, elektrik geriliminin değişmesinden, cihazların ısınmasından ortaya çıkan elektronik ölçme aletlerindeki salınımlardan kaynaklanabilir.

*Sıcaklık ölçümünden kaynaklı hatalar:*

- (a<sub>1</sub>) Isıl çiftlerden kaynaklanan hata =  $\pm 0.1$  °C
- (b<sub>1</sub>) Sıcaklık veri kayıt cihazından kaynaklanan hata =  $\pm 0.1$  °C
- (c<sub>1</sub>) Bağlantı elemanları ve noktalardan kaynaklanan hata =  $\pm 0.1$  °C
- (d<sub>1</sub>) Kollektör girişinde sıcaklığın ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata=  $\pm 0.1$  °C,
- (e<sub>1</sub>) Ortam sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata=  $\pm 0.1$  °C,
- (f<sub>1</sub>) Kollektör çıkışında sıcaklığın ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata=  $\pm 0.1$  °C,
- (g<sub>1</sub>) Boyler sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek hata=  $\pm 0.1$  °C

*Zaman ölçümünden kaynaklanan hatalar:*

- (a<sub>2</sub>) Zaman ölçerden kaynaklanan hata=  $\pm 0.0003$  dakika
- (b<sub>2</sub>) Periyodik olarak sıcaklık değerlerinin okunmasında yapılabilecek hata=  $\pm 0.10$  dakika
- (c<sub>2</sub>) Periyodik olarak hava hızının ölçümünden yapılabilecek ortalama hata =  $\pm 0,10$  dakika
- (d<sub>2</sub>) Periyodik olarak ısıtım ölçümünden yapılabilecek ortalama hata =  $\pm 0,10$  dakika
- (e<sub>2</sub>) Periyodik olarak nem ölçümünden yapılabilecek ortalama hata =  $\pm 0,10$  dakika

*Debi ölçümlerinde ortaya çıkabilecek hatalar:*

- (a<sub>3</sub>) Debimetre okuma belirsizliği =  $\pm 0.5-1$
- (b<sub>3</sub>) Sistem kaçaklarıyla ilgili belirsizlik=  $\pm 0.5-1$
- (c<sub>3</sub>) Sıcaklık farklarından kaynaklanan belirsizlik=  $\pm 0.5-1$

Herhangi bir parametredeki toplam hatanın belirlenmesi için sabit hataların, imalat hatalarının ve rasgele hataların dikkate alınmasıyla toplam hata değeri,

$$W_{th} = \left[ x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

denklemini ile hesaplanabilir. Bu denkleme göre yukarıda belirlenen hata miktarları kullanılarak Tablo 2.3' te görülen deneyler sırasında meydana gelen toplam hata miktarları hesaplanmıştır.

**Tablo 2.3.** Deneyler sırasında meydana gelen toplam hata miktarları

| Hata Oluşturan Parametreler                                                                    | Kullanılan denklem                                        | Toplam hata               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------|
| Kollektör girişinde sıcaklığın ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_{T_{kg}}$ )         | $W_{T_{kg}} = \left[ a_1^2 + b_1^2 + d_1^2 \right]^{1/2}$ | $\pm 0.173^\circ\text{C}$ |
| Kollektör çıkışında sıcaklığın ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_{T_{kc}}$ )         | $W_{T_{kc}} = \left[ a_1^2 + b_1^2 + f_1^2 \right]^{1/2}$ | $\pm 0.173^\circ\text{C}$ |
| Boylar sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ( $W_{T_b}$ )                       | $W_{T_b} = \left[ a_1^2 + b_1^2 + g_1^2 \right]^{1/2}$    | $\pm 0.173^\circ\text{C}$ |
| Ortam sıcaklık ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata ( $W_{T_o}$ )                          | $W_{T_o} = \left[ a_1^2 + b_1^2 + e_1^2 \right]^{1/2}$    | $\pm 0.173^\circ\text{C}$ |
| Periyodik olarak sıcaklık değerlerinin okunmasında ortaya çıkabilecek toplam hata ( $W_{ts}$ ) | $W_{ts} = \left[ a_2^2 + b_2^2 \right]^{1/2}$             | $\pm 0.1 \text{ dk}$      |
| Periyodik olarak hava hızının ölçümünden yapılabilecek ortalama hata ( $W_{tv}$ )              | $W_{ts} = \left[ a_2^2 + c_2^2 \right]^{1/2}$             | $\pm 0.1 \text{ dk}$      |
| Periyodik olarak ısıtım ölçümünden yapılabilecek ortalama hata ( $W_{ti}$ )                    | $W_{ts} = \left[ a_2^2 + d_2^2 \right]^{1/2}$             | $\pm 0.1 \text{ dk}$      |
| Periyodik olarak nem ölçümünden yapılabilecek ortalama hata ( $W_{tn}$ )                       | $W_{ts} = \left[ a_2^2 + e_2^2 \right]^{1/2}$             | $\pm 0.1 \text{ dk}$      |
| Debi ölçümünden kaynaklanabilecek toplam hata ( $W_{de}$ )                                     | $W_{ts} = \left[ a_3^2 + b_3^2 + c_3^2 \right]^{1/2}$     | $\pm 0.86 \text{ lt/h}$   |

### 3.BULGULAR

#### 3.1.Nanoakışkanların Hazırlanması İle İlgili Hesaplamalar

$\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$  ve  $\text{TiO}_2$  nanopartikülleri % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 olacak şekilde üç farklı hacimsel oranda temel akışkan olarak saf suyun içerisine katılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda saf su içerisine katılacak olan nanopartikülün oranları ve miktarları Tablo 3.1’ de verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Nanopartiküllerin oranları ve miktarları

| Partikül                | Hacimsel oran(%) | Kütlesel oran(%) | Nanopartikül kütlesi $m_p$ (gr) | Nanoakışkan kütlesi $m_n$ (gr) | $V_{su}$ (mL) |
|-------------------------|------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 0.2              | 0,00803          | 40                              | 4978,603                       | 4990          |
|                         | 0.4              | 0,01597          | 80                              | 5008,706                       | 4980          |
|                         | 0.8              | 0,03156          | 160                             | 5068,912                       | 4960          |
| $\text{CuO}$            | 0.2              | 0,01262          | 63,15                           | 5001,753                       | 4990          |
|                         | 0.4              | 0,02498          | 126,3                           | 5055,006                       | 4980          |
|                         | 0.8              | 0,04893          | 252,6                           | 5161,512                       | 4960          |
| $\text{TiO}_2$          | 0.2              | 0,00783          | 39                              | 4977,603                       | 4990          |
|                         | 0.4              | 0,01557          | 78                              | 5006,706                       | 4980          |
|                         | 0.8              | 0,0308           | 156                             | 5064,912                       | 4960          |

Hazırlanan nanoakışkanların resimleri Şekil 3.1., Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’te verilmiştir. Hazırlanan nanoakışkanların yaklaşık 90 güne kadar stabil kaldığı gözlenmiştir.



**Şekil 3.1.** Hazırlanan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoakışkanlarının resimleri



Şekil 3.2. Hazırlanan CuO nanoakışkanlarının resimleri



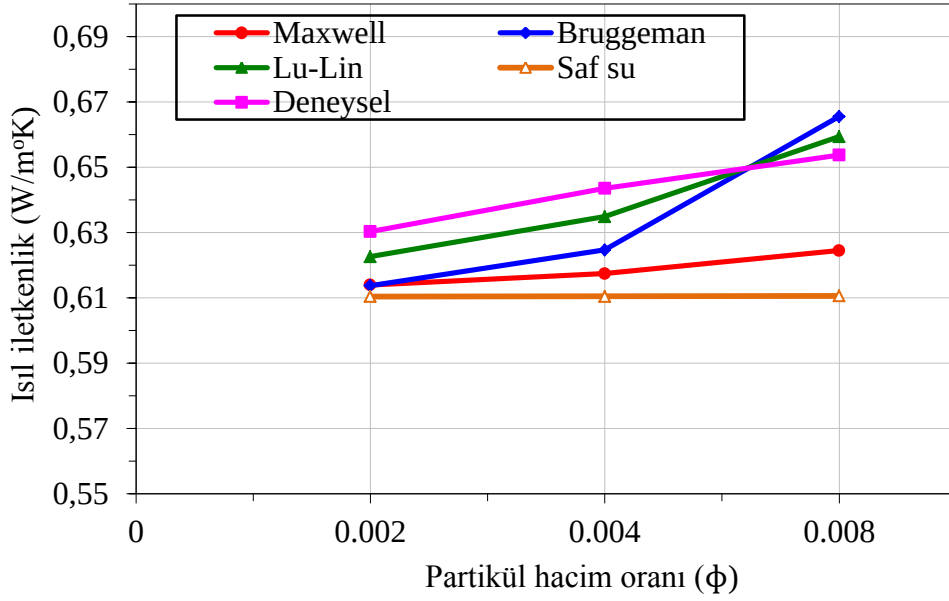
Şekil 3.3. Hazırlanan TiO<sub>2</sub> nanoakışkanlarının resimleri

### 3.2. Termofiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

#### 3.2.1. Isıl İletkenlik Ölçümleri

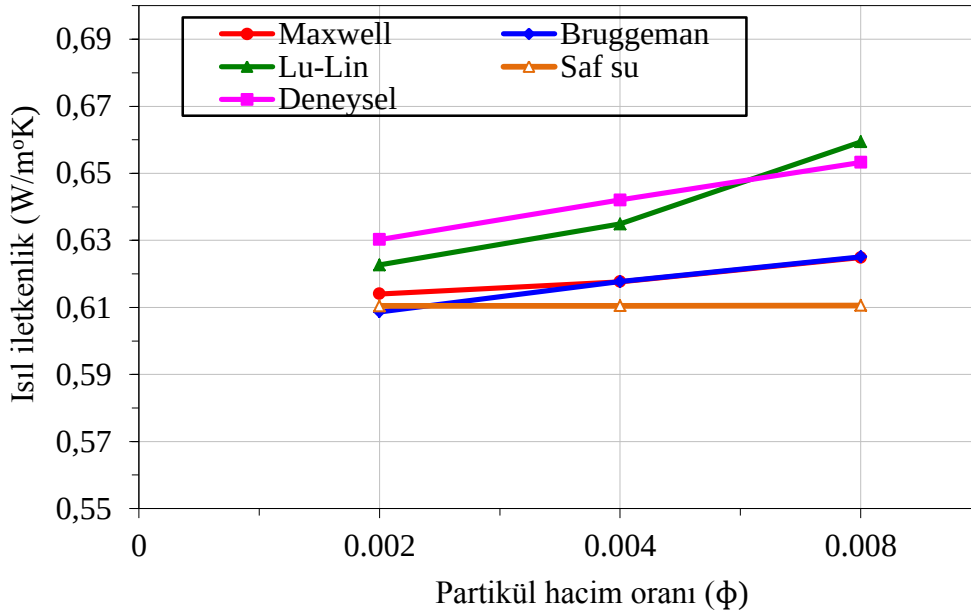
Nanoakışkanların ısı iletkenlik ölçümleri KD2 Pro cihazı ile tek sıcaklık değeri olan 30°C’de yapılmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen veriler mevcut Maxwell, Lu-Lin ve Bruggeman modelleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.4., Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.’ da Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su, CuO-su ve TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanlarının ısı iletkenliğinin modeller ile karşılaştırılmalı değişimleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, partikül hacim oranı artışıyla ısı iletkenlik değeri artmıştır ve ısı iletkenlik değerleri tüm karışım oranlarında temel akışkanın ısı iletkenlik değerinden fazladır. % 0.2 hacimsel oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanı için elde edilen

ısı iletkenlik değerleri Maxwell eşitliği ile karşılaştırıldığında % 2.66, Bruggeman modeli için % 2.69, Lu-Lin modeli için ise % 1.23 daha fazladır (şekil 3.4).



şekil 3.4.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su nanoakışkanının ısı iletkenliğinin modeller ile karşılaştırılması

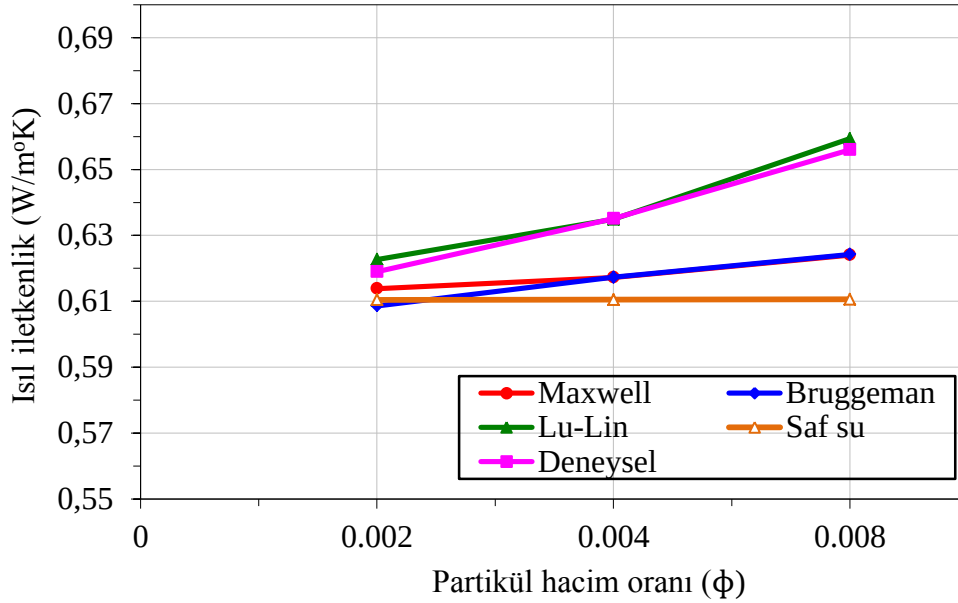
Aynı şekilde % 0.4 hacimsel oranlı  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su nanoakışkanı için elde edilen ısı iletkenlik değerleri Maxwell eşitliği ile karşılaştırıldığında % 4.23, Bruggeman modeli için % 3.02, Lu-Lin modeli için ise % 1.37 daha fazladır.



şekil 3.5.  $\text{CuO}$ -su nanoakışkanının ısı iletkenliğinin modeller ile karşılaştırılması

% 0.8 hacimsel oranlı  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su nanoakışkanı için elde edilen ısı iletkenlik değeri Maxwell eşitliği ile karşılaştırıldığında % 4.68 daha fazla, Bruggeman modeli için % 1.78, Lu-Lin modeli için ise % 0.86 daha azdır.

% 0.2 hacimsel oranlı CuO-su nanoakışkanı için elde edilen ısı iletkenlik değeri Maxwell eşitliği ile karşılaştırıldığında % 2.63, Bruggeman modeli için % 3.54, Lu-Lin modeli için ise % 1.21 daha fazladır (Şekil 3.5). Aynı şekilde % 0.4 hacimsel oranlı CuO-su nanoakışkanı için elde edilen ısı iletkenlik değeri Maxwell eşitliği ile karşılaştırıldığında % 3.95, Bruggeman modeli için % 3.94, Lu-Lin modeli için ise % 1.12 daha fazladır. % 0.8 hacimsel oranlı CuO-su nanoakışkanı için elde edilen ısı iletkenlik değeri Maxwell eşitliği ile karşılaştırıldığında % 4.54, Bruggeman modeli için % 4.50 daha fazla, Lu-Lin modeli için ise % 0.93 daha azdır.



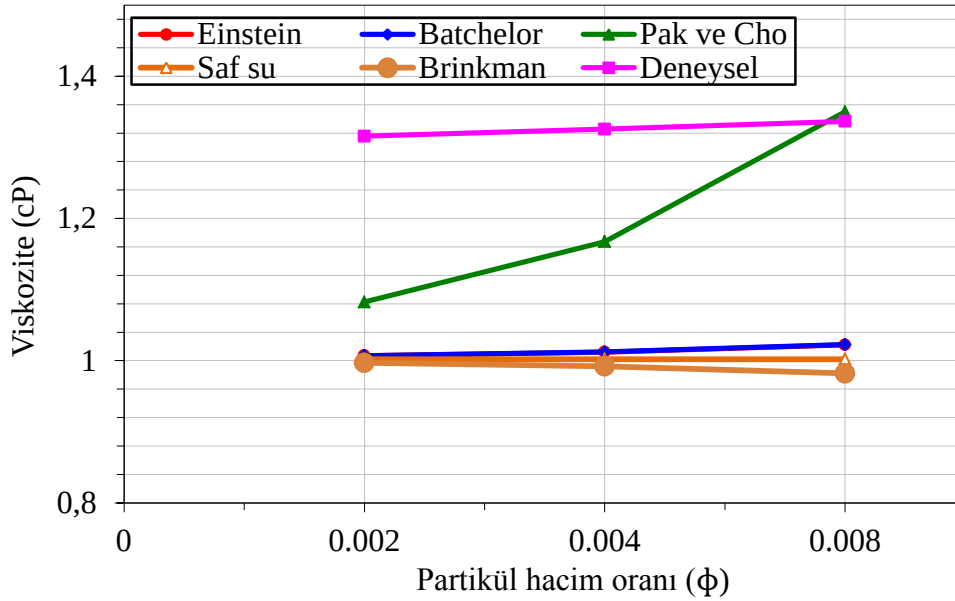
**Şekil 3.6.**  $\text{TiO}_2$ -su nanoakışkanının ısı iletkenliğinin modeller ile karşılaştırılması

Son olarak % 0.2 hacimsel oranlı  $\text{TiO}_2$ -su nanoakışkanı için elde edilen ısı iletkenlik değeri Maxwell eşitliği ile karşılaştırıldığında % 0.84, Bruggeman modeli için % 1.71 daha fazla, Lu-Lin modeli için ise % 0.6 daha azdır (Şekil 3.5). Aynı şekilde % 0.4 hacimsel oranlı  $\text{TiO}_2$ -su nanoakışkanı için elde edilen ısı iletkenlik değeri Maxwell eşitliği ile karşılaştırıldığında % 2.93, Bruggeman modeli için % 2.95, Lu-Lin modeli için ise % 0.3 daha fazladır. % 0.8 hacimsel oranlı  $\text{TiO}_2$ -su nanoakışkanı için elde edilen ısı iletkenlik değeri Maxwell eşitliği ile karşılaştırıldığında % 5.12, Bruggeman modeli için % 4.5 daha fazla, Lu-Lin modeli için ise % 4.49 daha azdır (Şekil 3.6). Verilen şekillerden görüldüğü üzere, ısı

iletkenliklerin hacimsel oranlarla değişimi ile elde edilen veriler modellerle uyum içerisinde. Üç hacimsel oran için de ısı iletkenlik değeri modellere kıyasla daha fazladır. % 0.2  $Al_2O_3$  nanopartikül içeren akışkanın ısı iletkenlik değeri saf suyun ısı iletkenliğine kıyasla yaklaşık % 3.25 artmıştır. Bu artış % 0.4  $Al_2O_3$  için % 5.41, % 0.8  $Al_2O_3$  için % 7.06'dır. % 0.2 CuO nanopartikül içeren akışkanın ısı iletkenlik değeri saf suyun ısı iletkenliğine kıyasla yaklaşık % 3.24 ; % 0.4 CuO için % 11.38, % 0.8 CuO için % 12.83 artmıştır. % 0.2  $TiO_2$  nanopartikül içeren akışkanın ısı iletkenlik değeri saf suyun ısı iletkenliğine kıyasla yaklaşık % 1.39 ; % 0.4  $TiO_2$  için % 5.16, % 0.8  $TiO_2$  için % 6.98 artmıştır.

### 3.2.2. Viskozite Ölçümleri

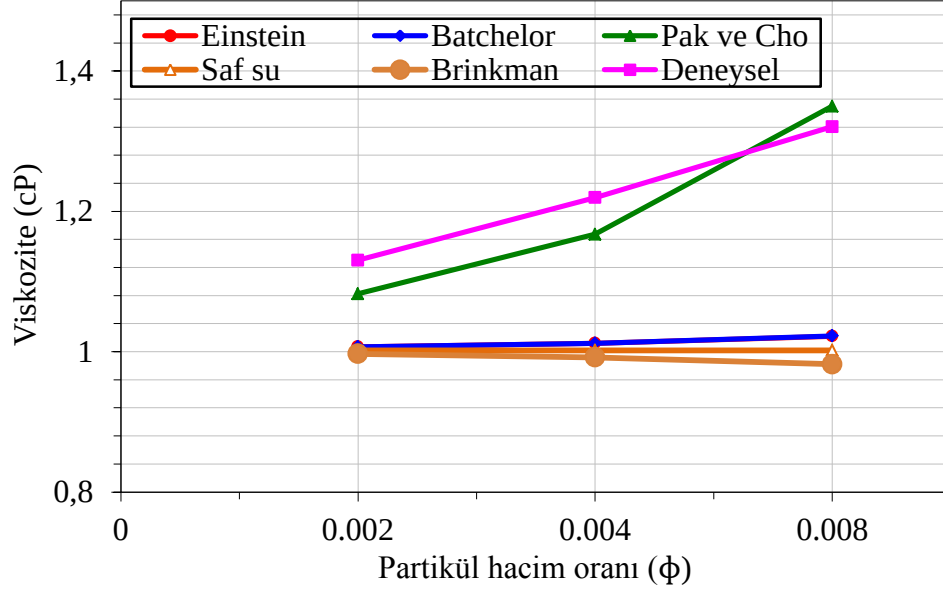
% 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlarındaki nanoakışkanların 30 °C sıcaklıktaki viskoziteleri Fungilab marka viskozimetre ile ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde şekil 3.7., şekil 3.8. ve şekil 3.9.'da verildiği gibi partikül konsantrasyonu arttıkça viskozitenin arttığı gözlemlenmiştir.



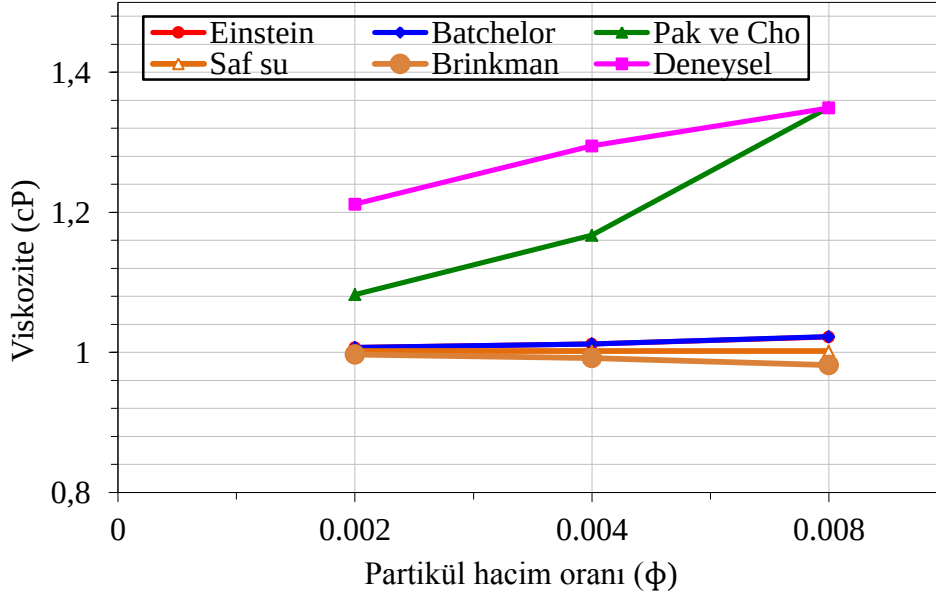
Şekil 3.7.  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanının viskozitesinin modeller ile karşılaştırılması

Deneysel sonuçlar literatürdeki Einstein, Batchelor, Pak-Cho ve Brinkman viskozite modelleri ile karşılaştırılınca genel olarak uyum içinde olduğu görülmüştür. Deneysel viskozite ölçümleri modellere kıyasla daha fazladır. % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlı nanoakışkanlar için viskozite değeri ölçümlere en yakın model Pak ve Cho olduğu görülmüştür. % 0.2 oranlı  $Al_2O_3$  nanoakışkanı için Einstein, Batchelor, Pak-Cho ve Brinkman

viskozite modellerinde sırasıyla % 30.64, % 30.65, % 21.53 ve % 31.95 daha fazladır. % 0.4 oranlı  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoakışkanı için sırasıyla % 30.98, % 30.97, % 13.56 ve % 33.63 daha fazladır. % 0.8 oranlı  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoakışkanı için sırasıyla % 30.77, % 30.72, % 1.08 ve % 36.10 daha fazladır. Hacimsel konsantrasyon arttıkça modellerden sapmaların daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8. CuO-su nanoakışkanının viskozitesinin modeller ile karşılaştırılması



Şekil 3.9. TiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanının viskozitesinin modeller ile karşılaştırılması

% 0.2 oranlı CuO nanoakışkanı için Einstein, Batchelor, Pak-Cho ve Brinkman viskozite modellerinde sırasıyla % 12.26, % 12.25, % 4.43 ve % 13.39 daha fazladır. % 0.4 oranlı CuO nanoakışkanı için sırasıyla % 20.50, % 20.49, % 4.47 ve % 22.9 daha fazladır. % 0.8 oranlı CuO nanoakışkanı için sırasıyla % 29.2, % 29.1, % 3.2 ve % 34.4 daha fazladır. Hacimsel konsantrasyon arttıkça modellerden sapmaların daha fazla olduğu görülmektedir.

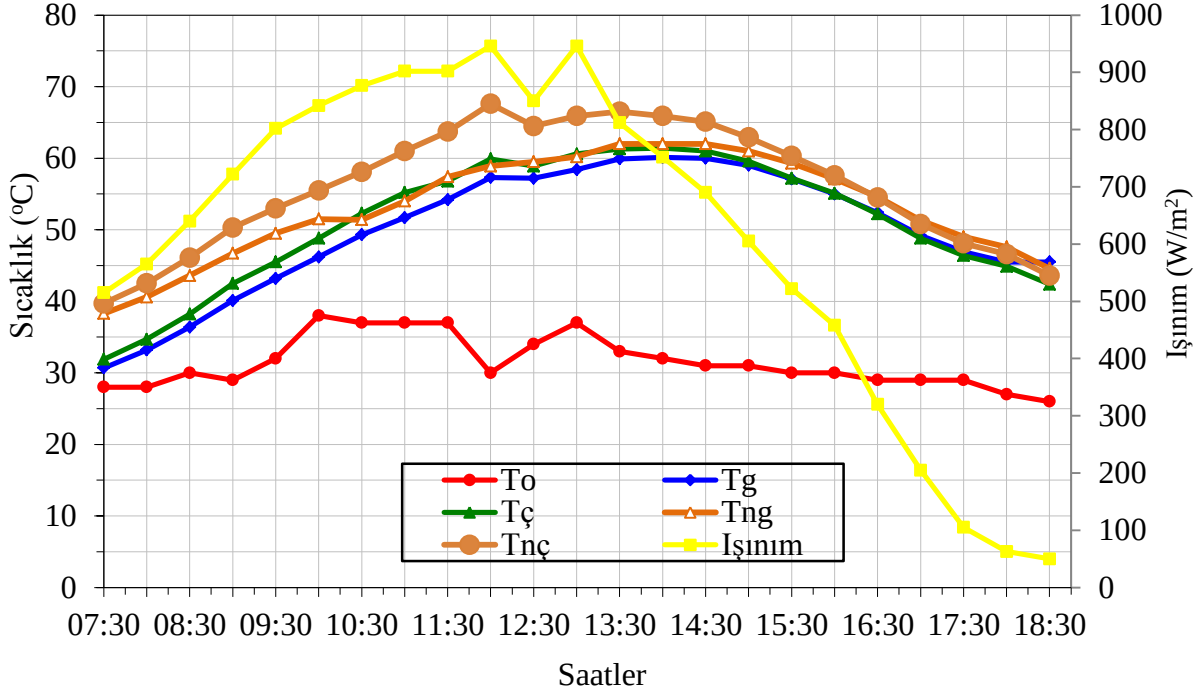
% 0.2 oranlı TiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için Einstein, Batchelor, Pak-Cho ve Brinkman viskozite modellerinde sırasıyla % 20.33, % 20.32, % 11.94 ve % 21.54 daha fazladır. % 0.4 oranlı TiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için sırasıyla % 27.94, % 27.89, % 10.92 ve % 30.52 daha fazladır. % 0.8 oranlı TiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için sırasıyla % 32.26, % 31.95, % 1.1 ve % 37.37 daha fazladır. Hacimsel konsantrasyon arttıkça modellerden sapmaların daha fazla olduğu görülmektedir. Korelasyonlara göre efektif viskozite temel akışkanın viskozitesine ve partikül konsantrasyonuna bağlıdır. Fakat deneysel sonuçlar partikül türünün de efektif viskozite üzerinde etkisi olduğunu göstermiştir. Modeller ile deneysel sonuçlar arasındaki farkın nedenleri; partikül boyutunun ve geometrisinin etkisinin modellerde dikkate alınmamış olması olabilir.

### **3.3. Kollektör Verim Deneyleri**

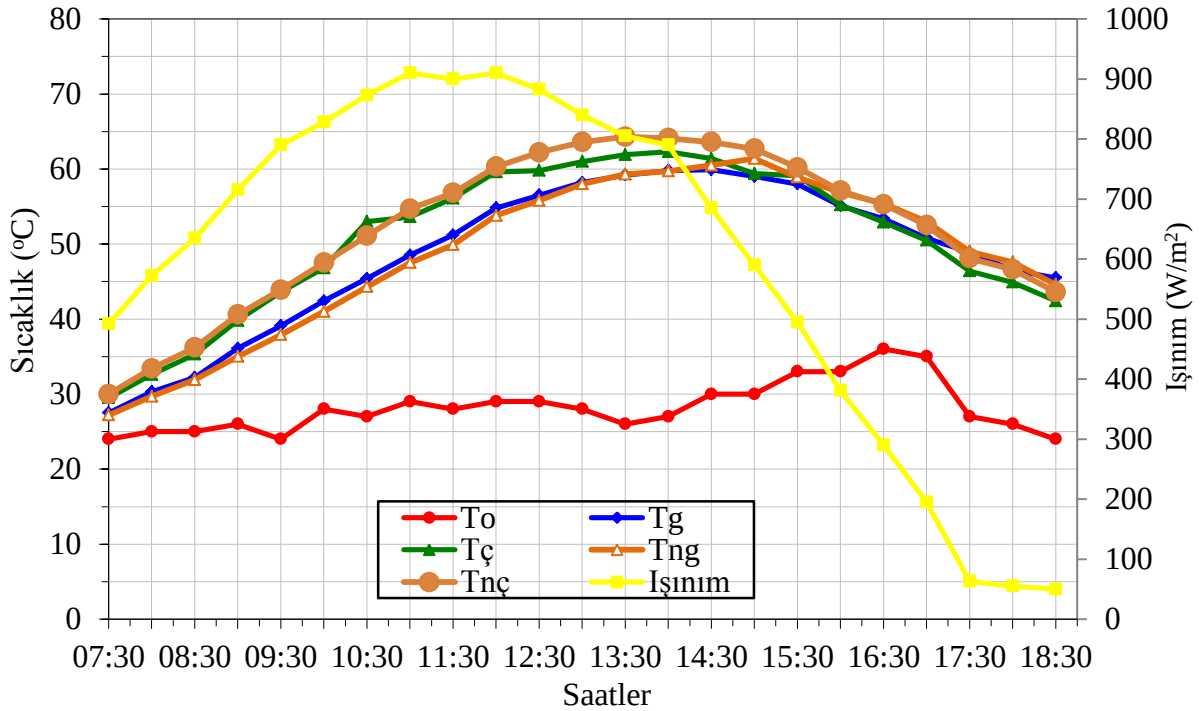
#### **3.3.1. Gün İçerisinde Sıcaklık-Işınım-Saat Değişimleri**

Nanoakışkanların düzlemsel güneş kolektörlerinde verim üzerindeki etkilerini incelemek üzere iki cebri taşınımlı sistem tasarlanmıştır. Birinde ısı transfer akışkanı olarak su, diğerinde ise üç farklı hacimsel oranlarda( % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 ) hazırlanan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-saf su, CuO-saf su ve TiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanları kullanılmıştır. Üç farklı 50 lt/h, 150lt/h ve 250 lt/h hacimsel debilerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Her iki sistemden, kararlı hale gelmesi sağlandıktan sonra, 07:30 ile 18:30 saatleri arasında 30 dakika aralıklarla aynı anda okunan kolektör giriş ( $T_g$ ), kolektör çıkış (  $T_c$  ) ve çevre sıcaklıkları ( $T_o$ ); ışıınım, rüzgar hızı, nem verileri ışığında kıyaslama yapılmıştır. ASHRAE standart koşullarını karşılayan en iyi veriler alınarak Şekil 3.10 ile Şekil 3.36 arasında verilmiştir. Cebri taşınımlı sistemlerde su ve nanoakışkan debisinin verim üzerindeki etkisi araştırılmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen verilerin tümünde, kolektör su çıkış sıcaklıklarının güneş ışıınımlı ile değiştiği, gün boyunca kolektör giriş su sıcaklıklarının saat 14.30'a kadar, çıkış sıcaklıklarının saat 13.30'a kadar arttığı daha sonra azaldığı görülmüştür. İş yapan akışkan olarak nanoakışkanın kullanıldığı sistemdeki bütün debi değerleri ve nanoakışkan türlerinde kolektör çıkış sıcaklıklarının, su kullanılan sisteme göre daha yüksek olduğu ölçülmüştür. Kollektör giriş ve çıkışındaki sıcaklık değerlerindeki değişimler ışıınım, nem ve hız

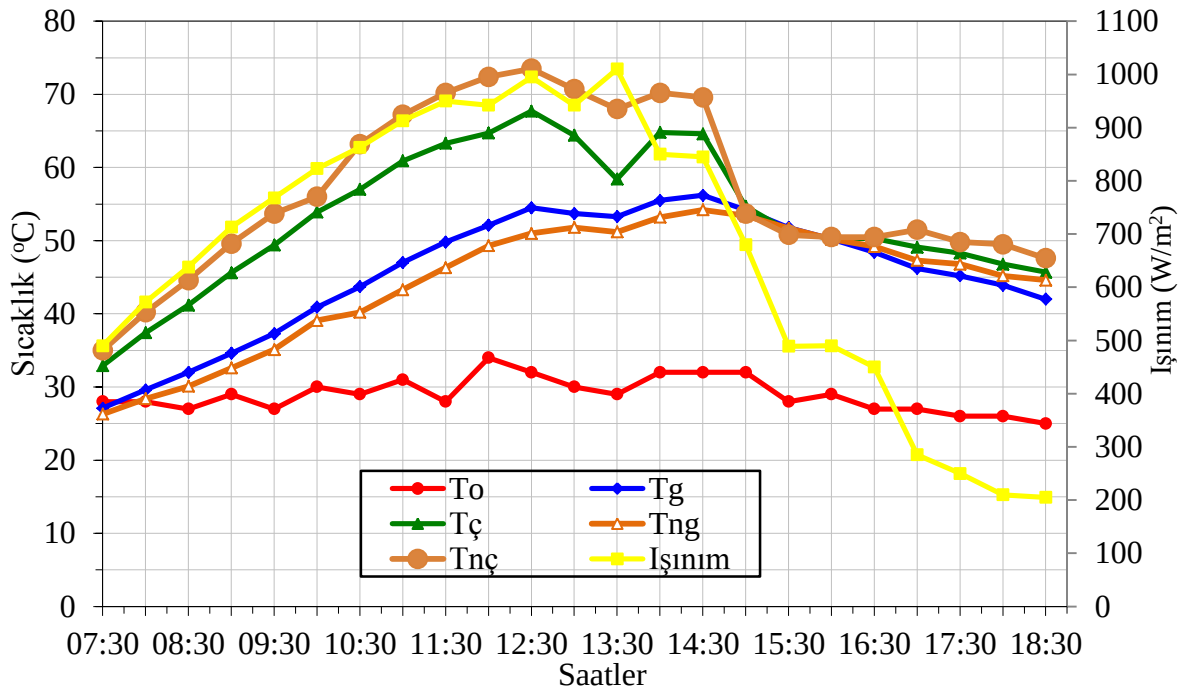
değerlerine bağlı olarak değişim göstermiştir. Her iki sistemdeki depo suyu sıcaklıklarının ölçümlerinde de aynı şekilde sıcaklıkların saat 14.30'a kadar arttığı ve nanoakışkanlı sistemdeki depo suyu sıcaklığının bütün oranlar ve debilerde sulu sisteme göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



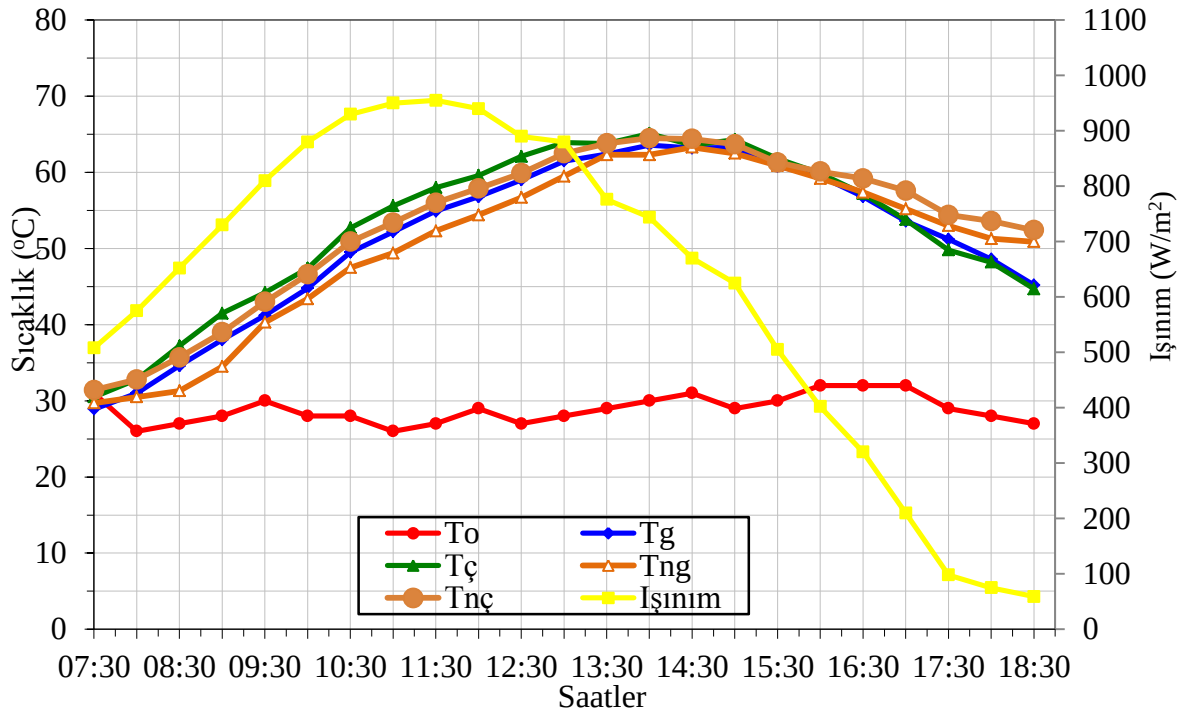
Şekil 3.10. % 0.2  $Al_2O_3$  hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler



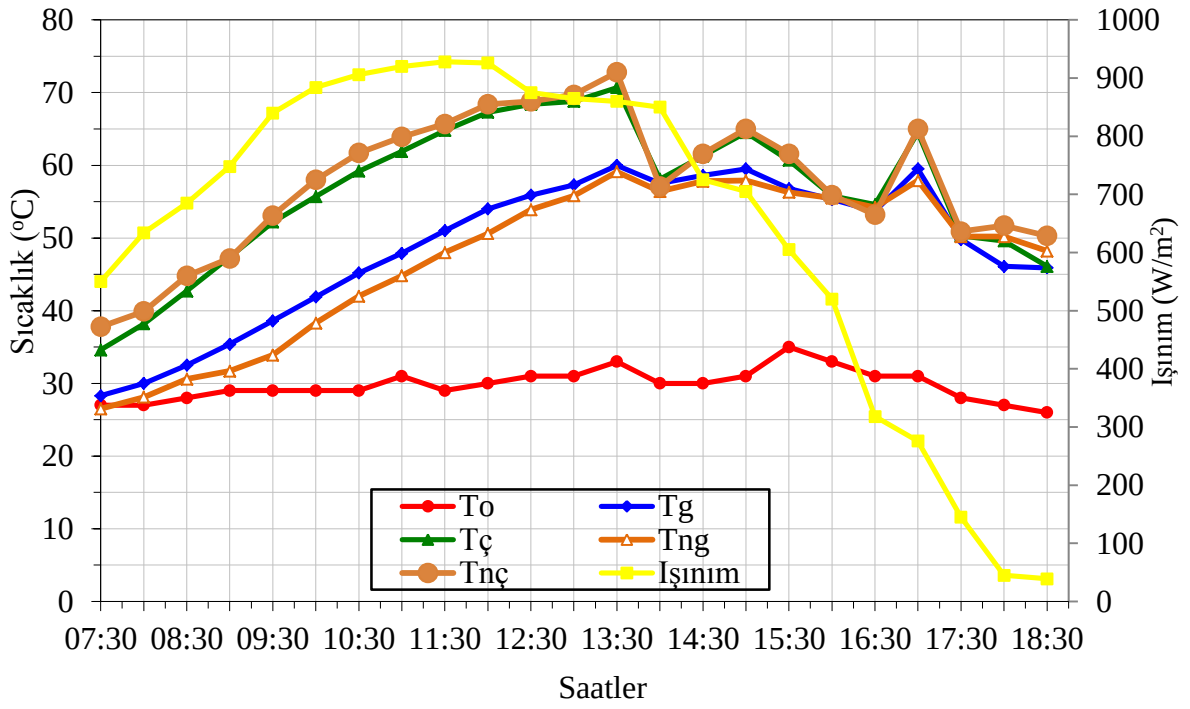
Şekil 3.11. % 0.2  $Al_2O_3$  hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler



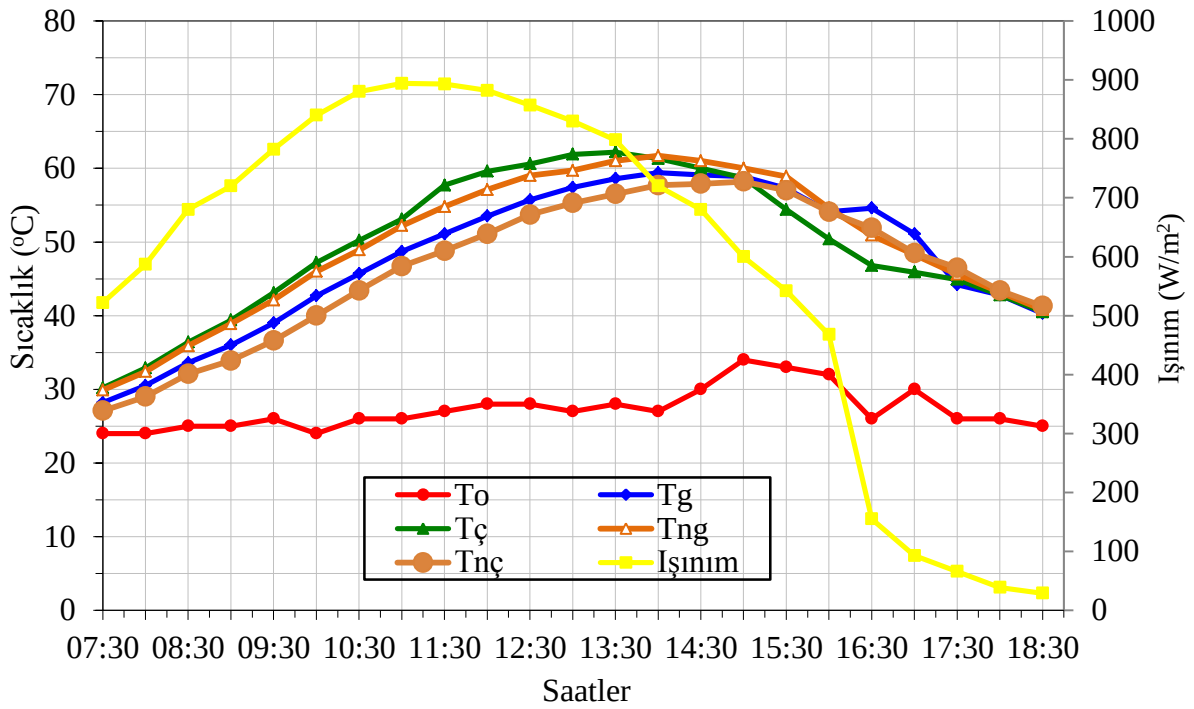
Şekil 3.12. % 0.2  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler



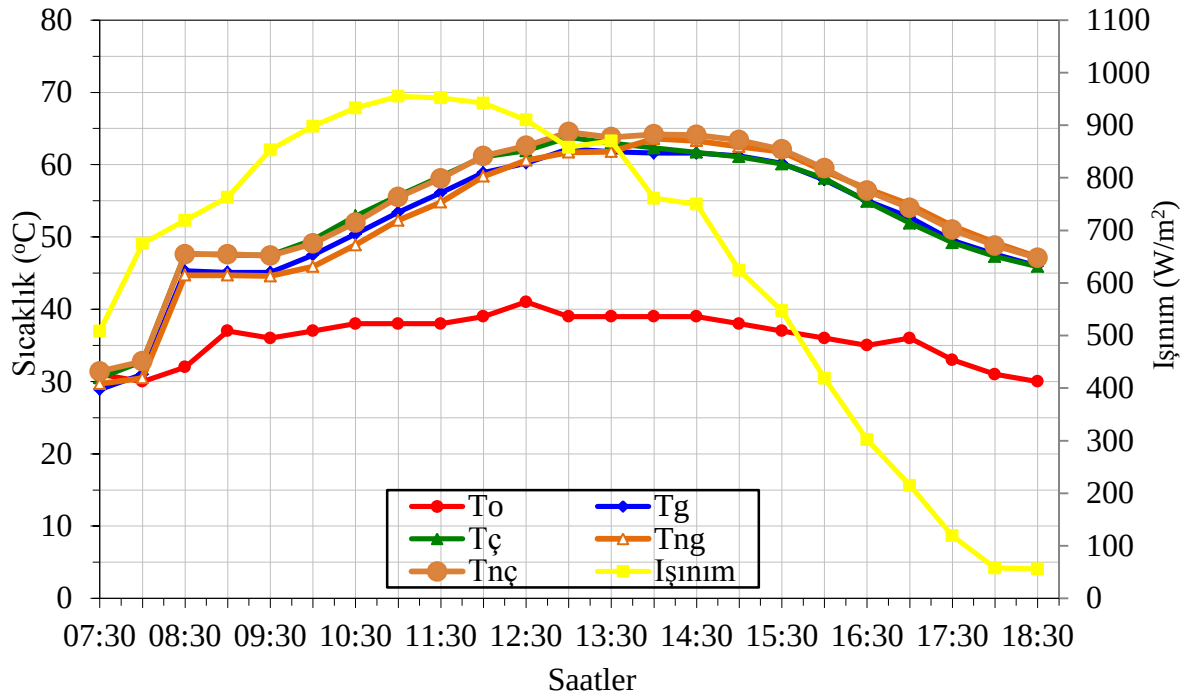
Şekil 3.13. % 0.4  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler



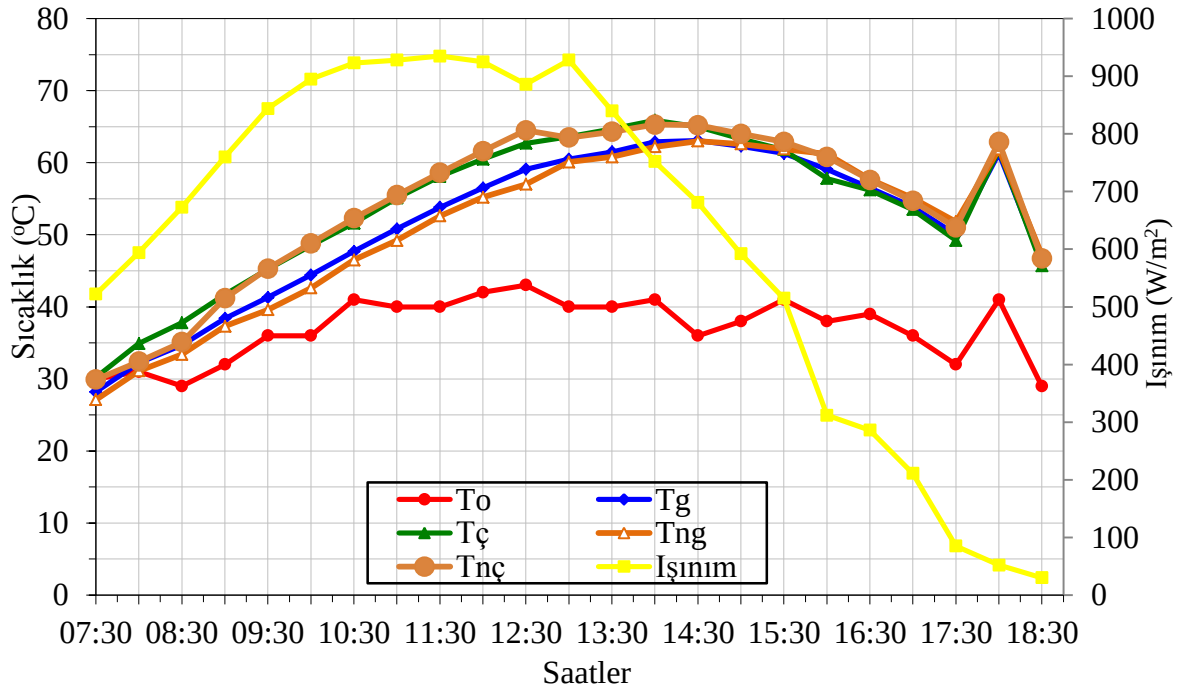
Şekil 3.14. % 0.4  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler



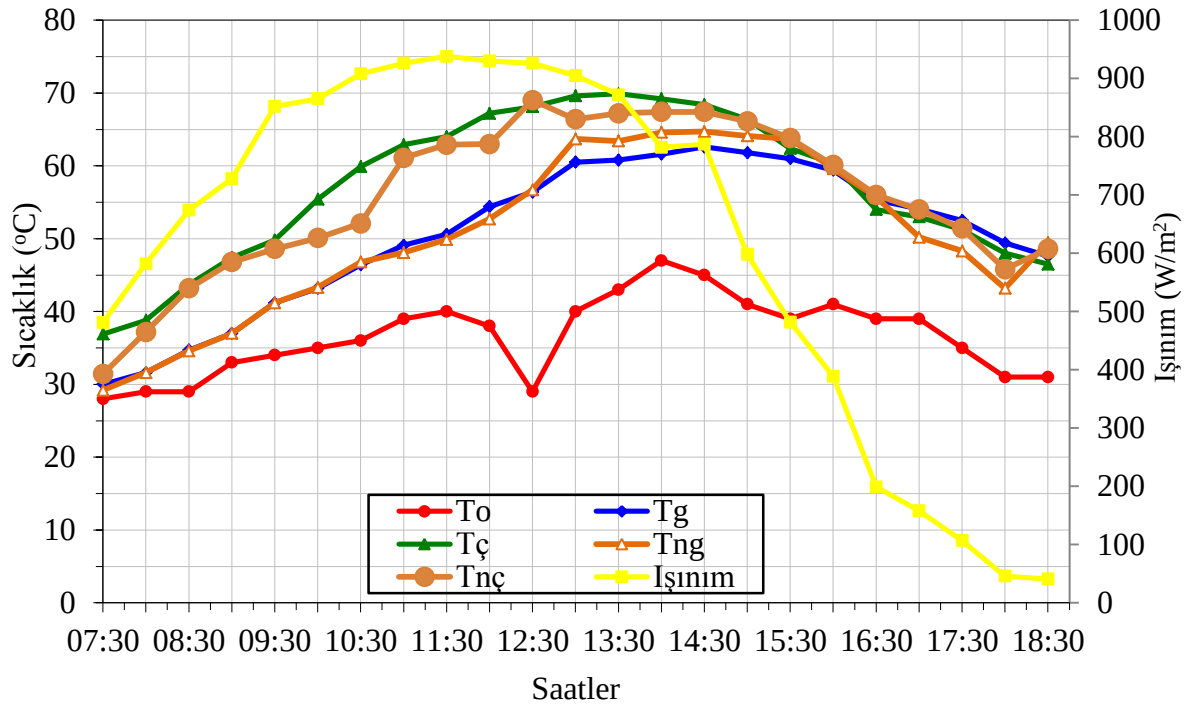
Şekil 3.15. % 0.4  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler



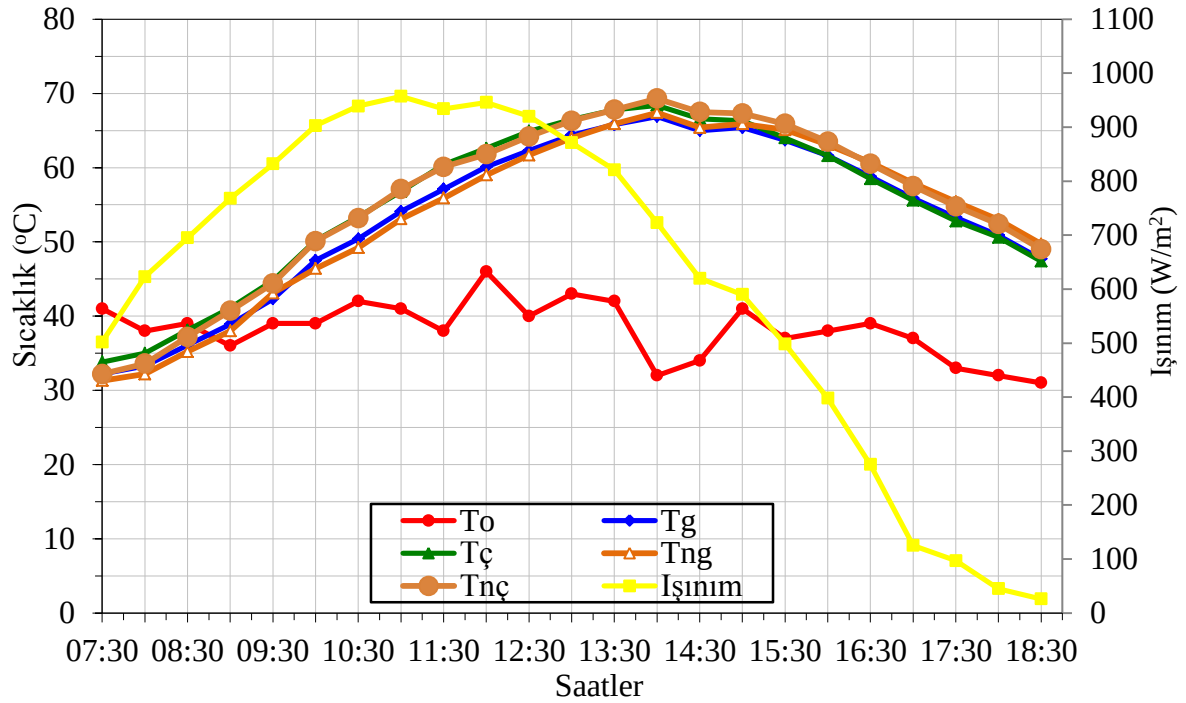
Şekil 3.16. % 0.8  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler



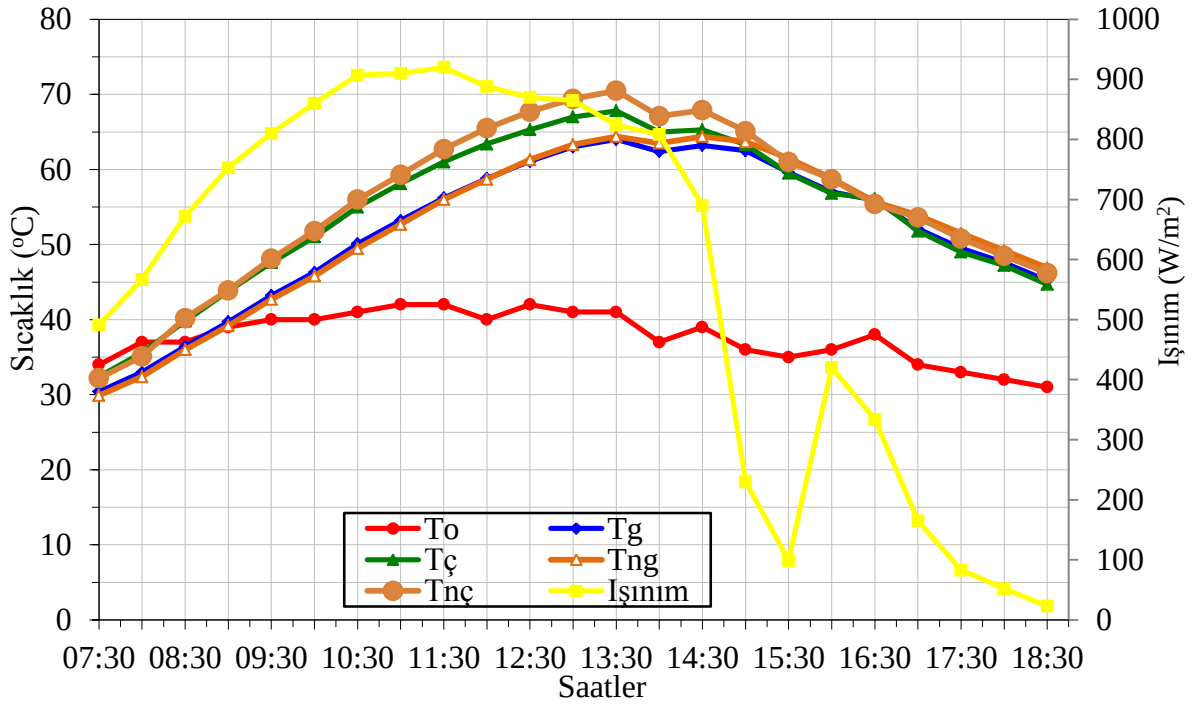
Şekil 3.17. % 0.8  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler



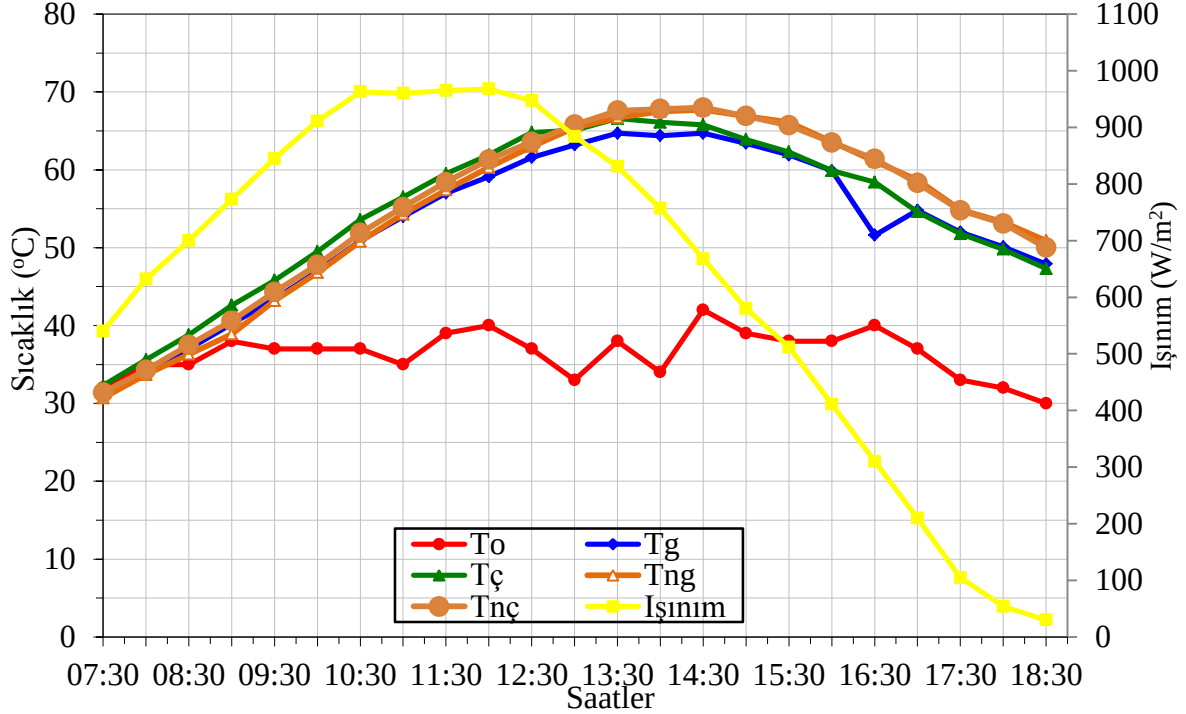
Şekil 3.18. % 0.8  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler



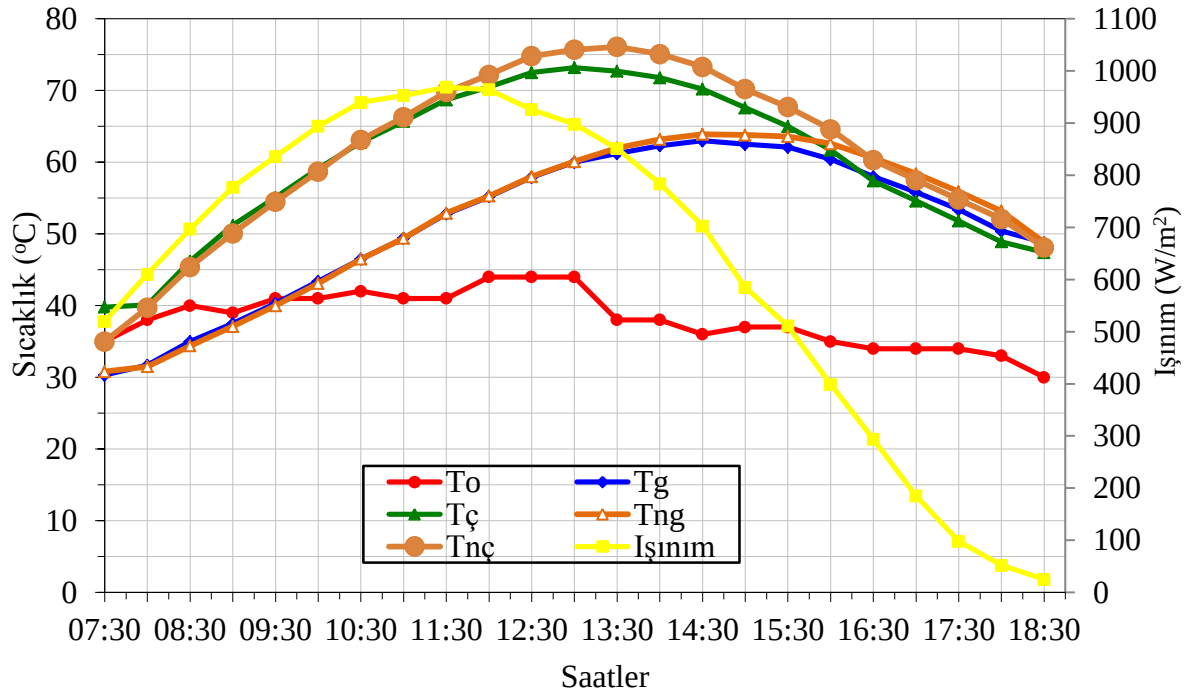
Şekil 3.19. % 0.2  $\text{CuO}$  hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler



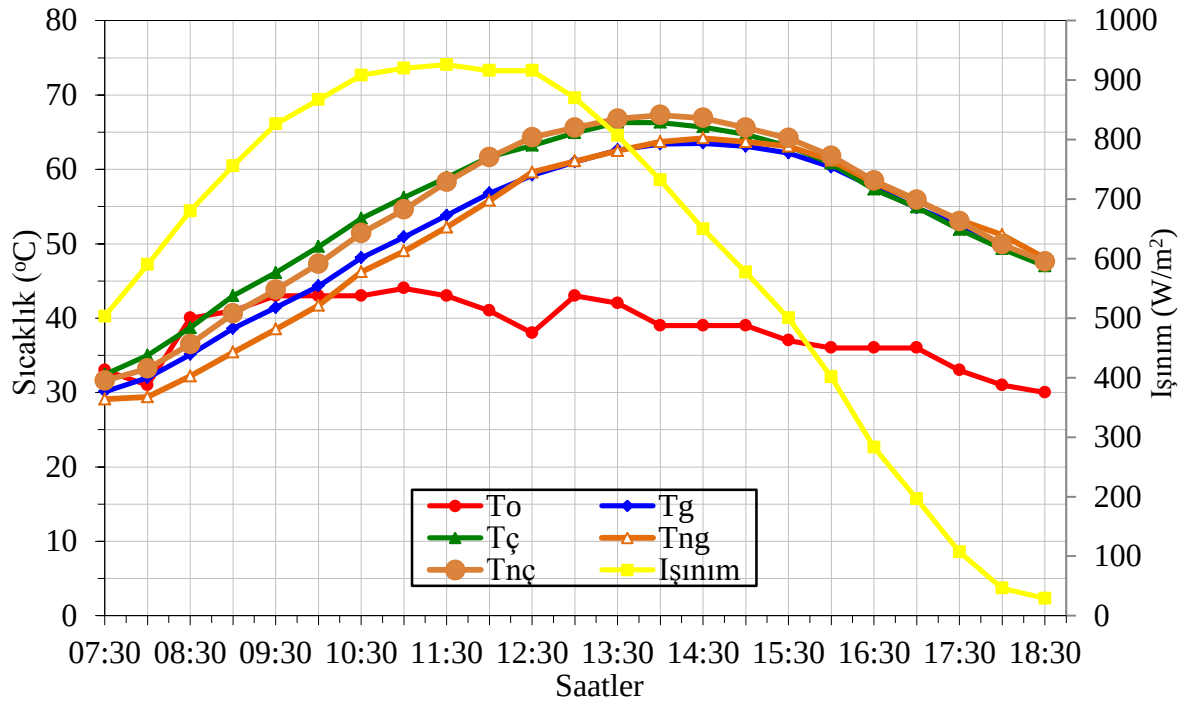
Şekil 3.20. % 0.2 CuO hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler



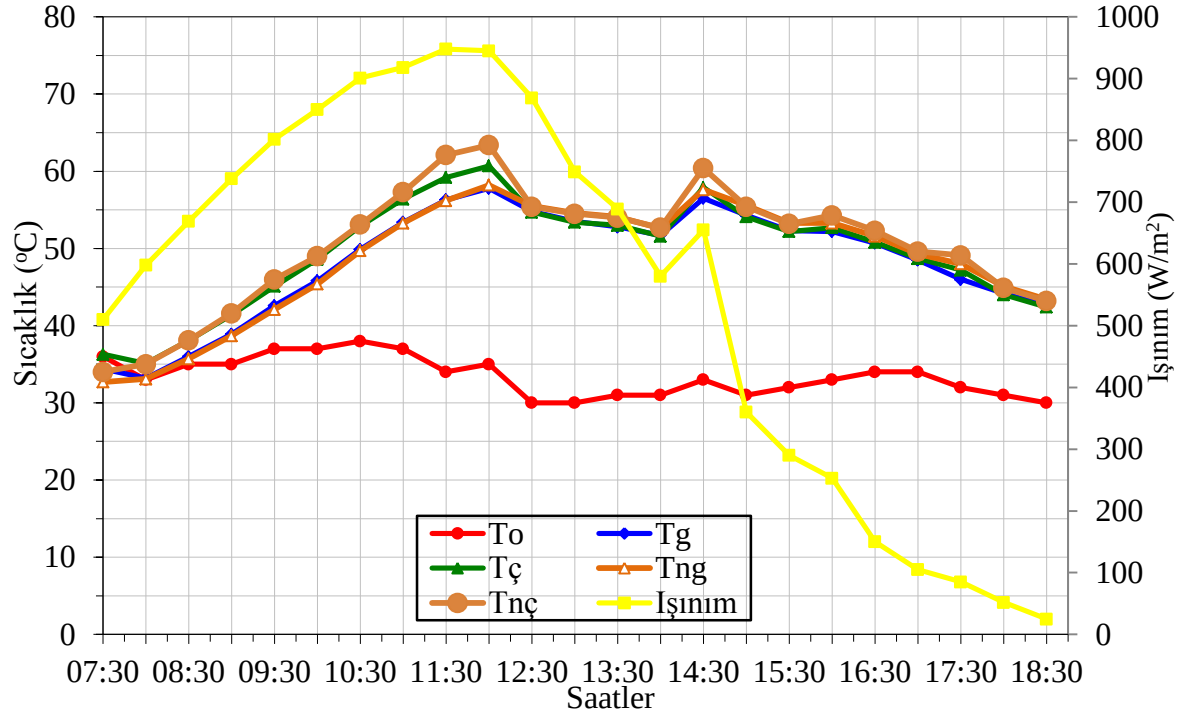
Şekil 3.21. % 0.2 CuO hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler



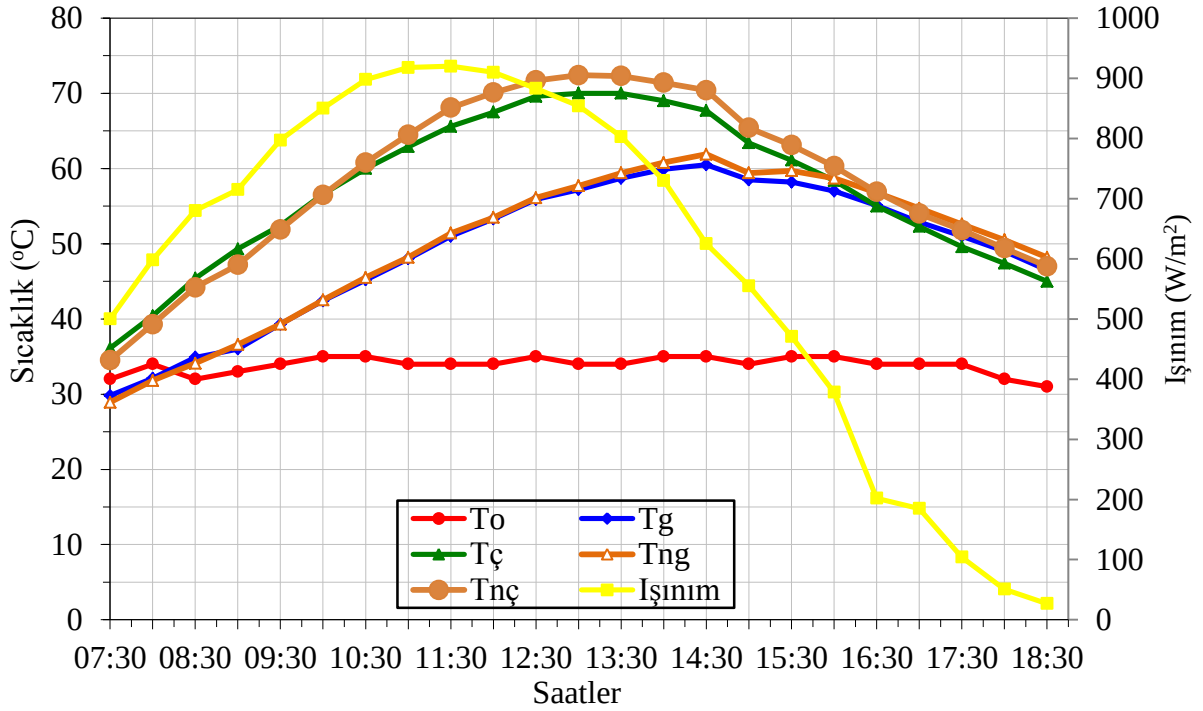
Şekil 3.22. % 0.4 CuO hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler



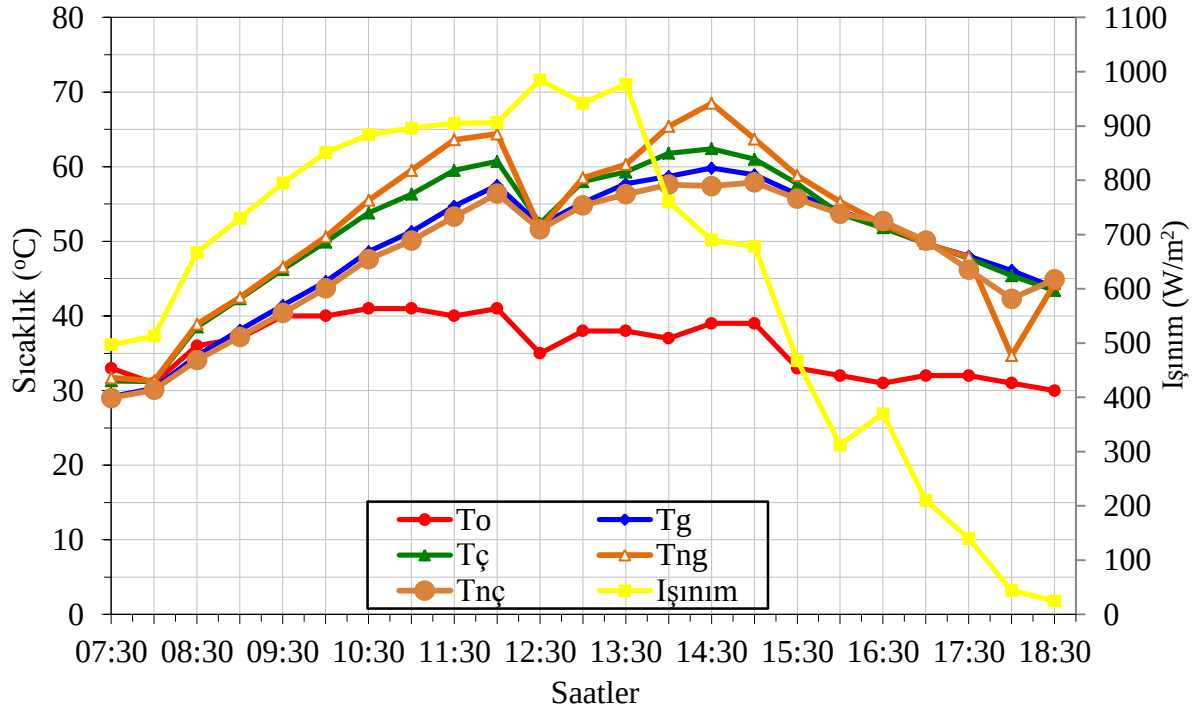
Şekil 3.23. % 0.4 CuO hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler



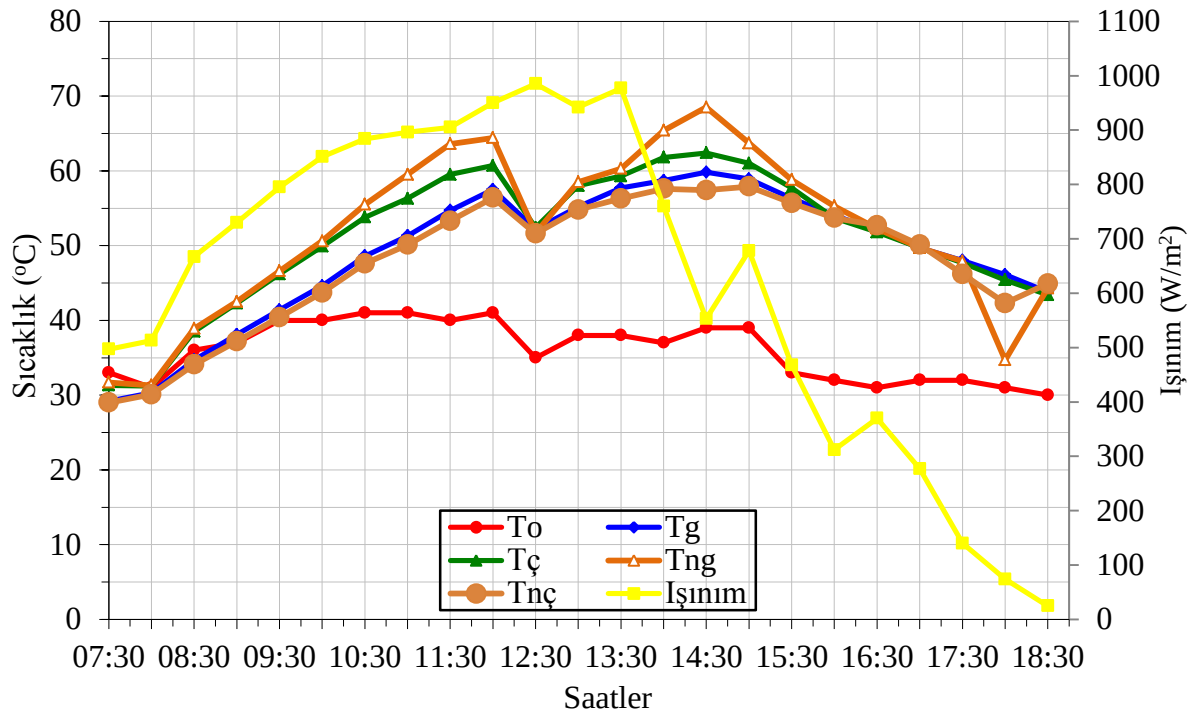
Şekil 3.24. % 0.4 CuO hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler



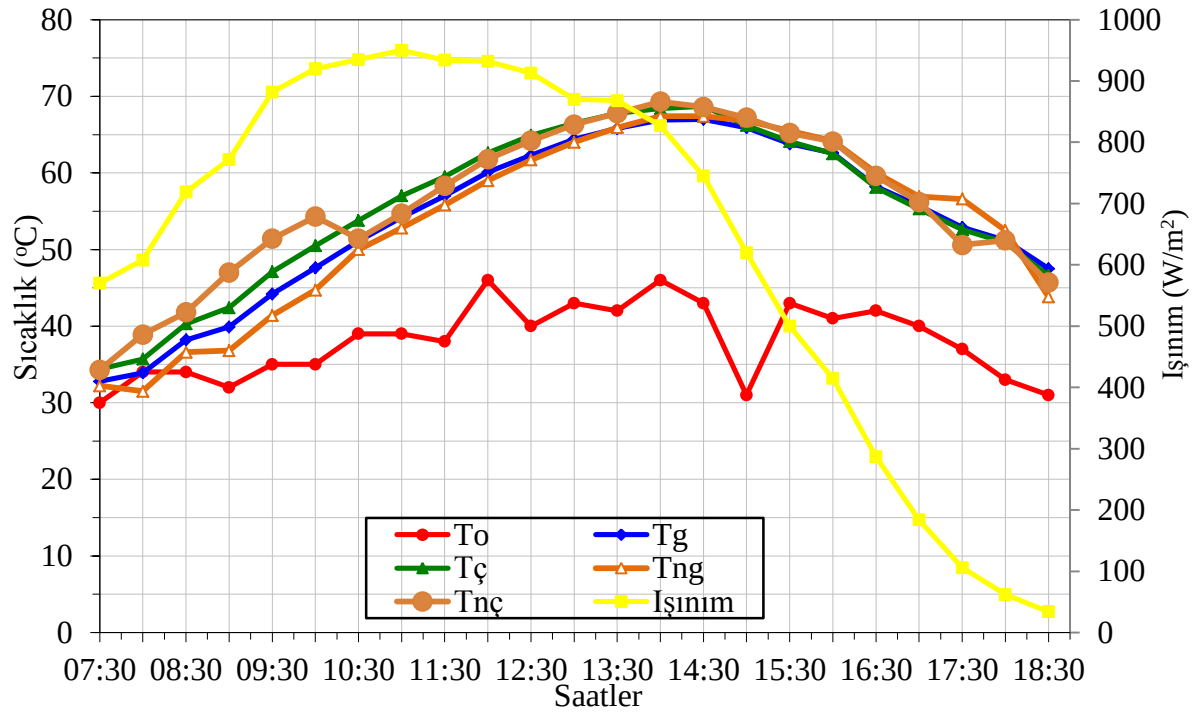
Şekil 3.25. % 0.8 CuO hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler



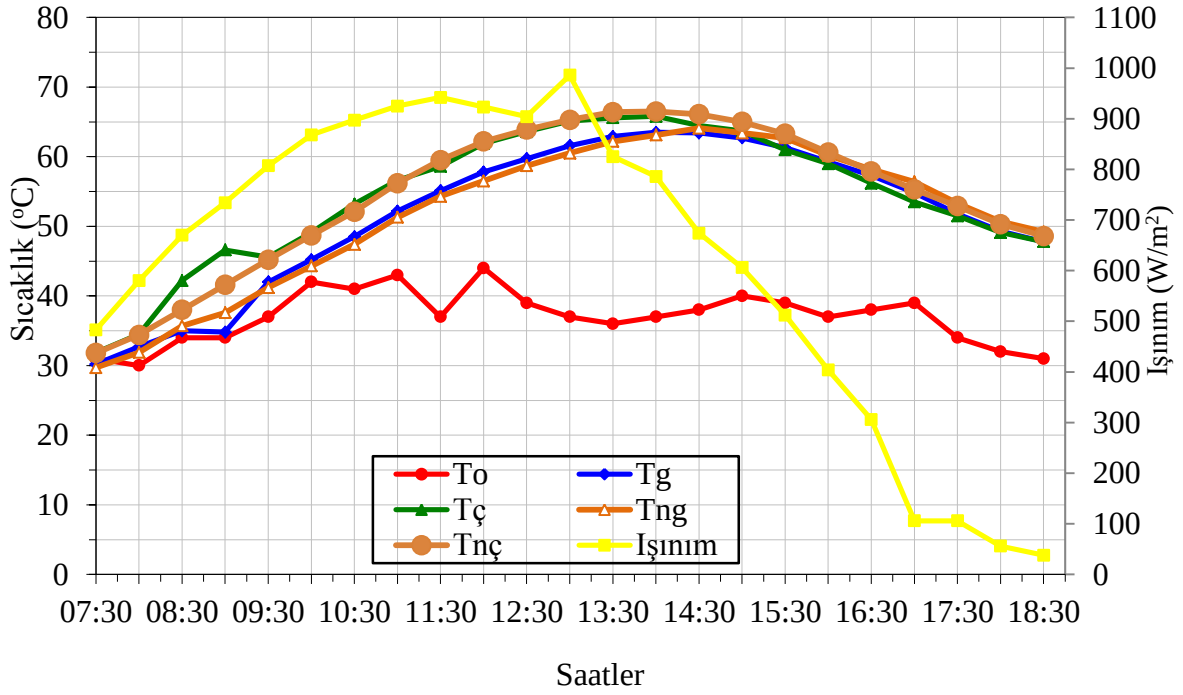
Şekil 3. 26. % 0.8 CuO hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler



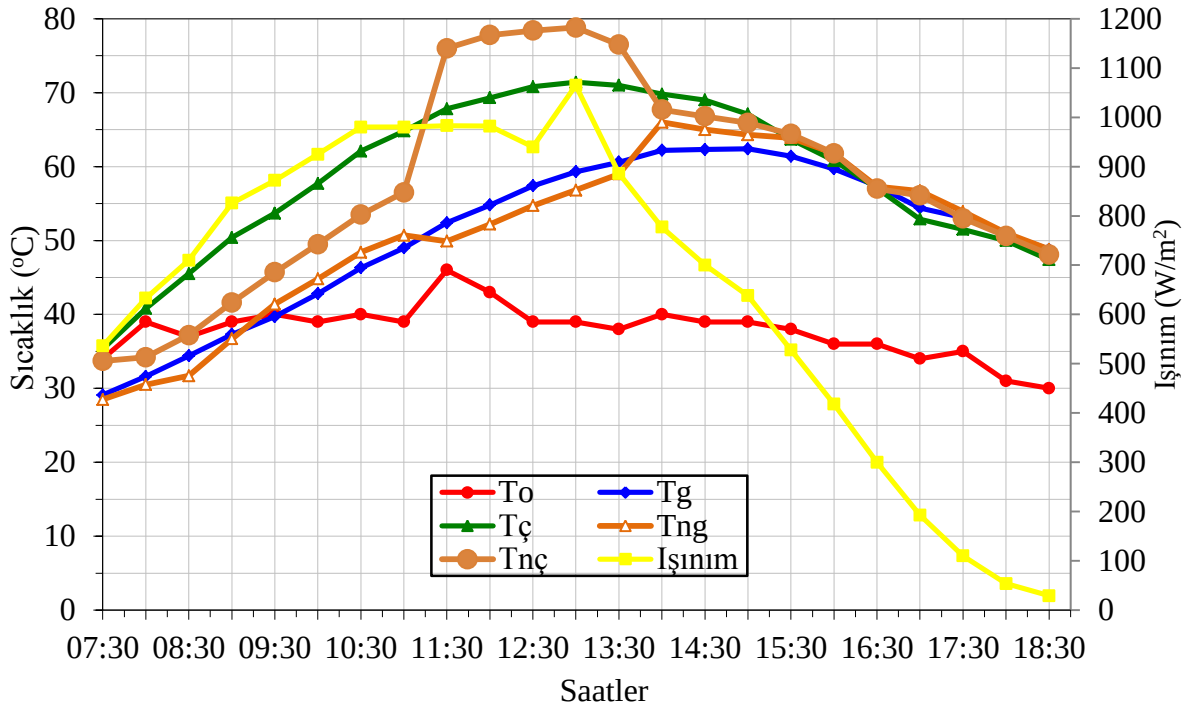
Şekil 3. 27. % 0.8 CuO hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler



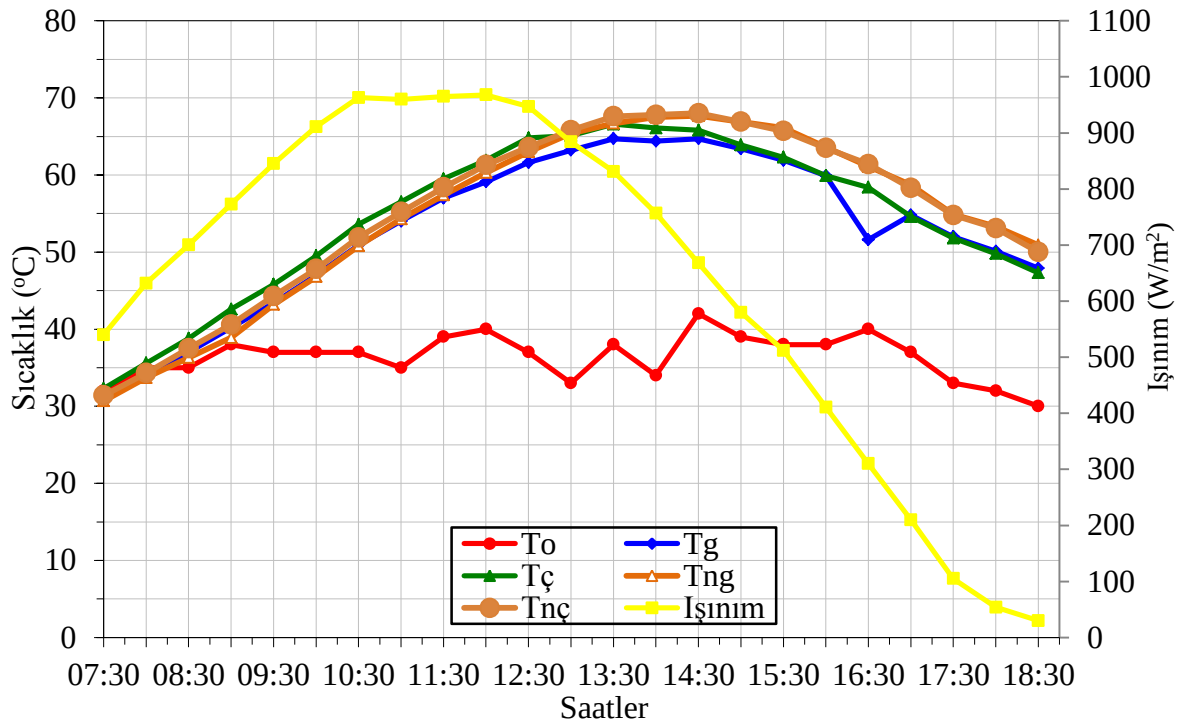
Şekil 3.28. % 0.2  $TiO_2$  hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler



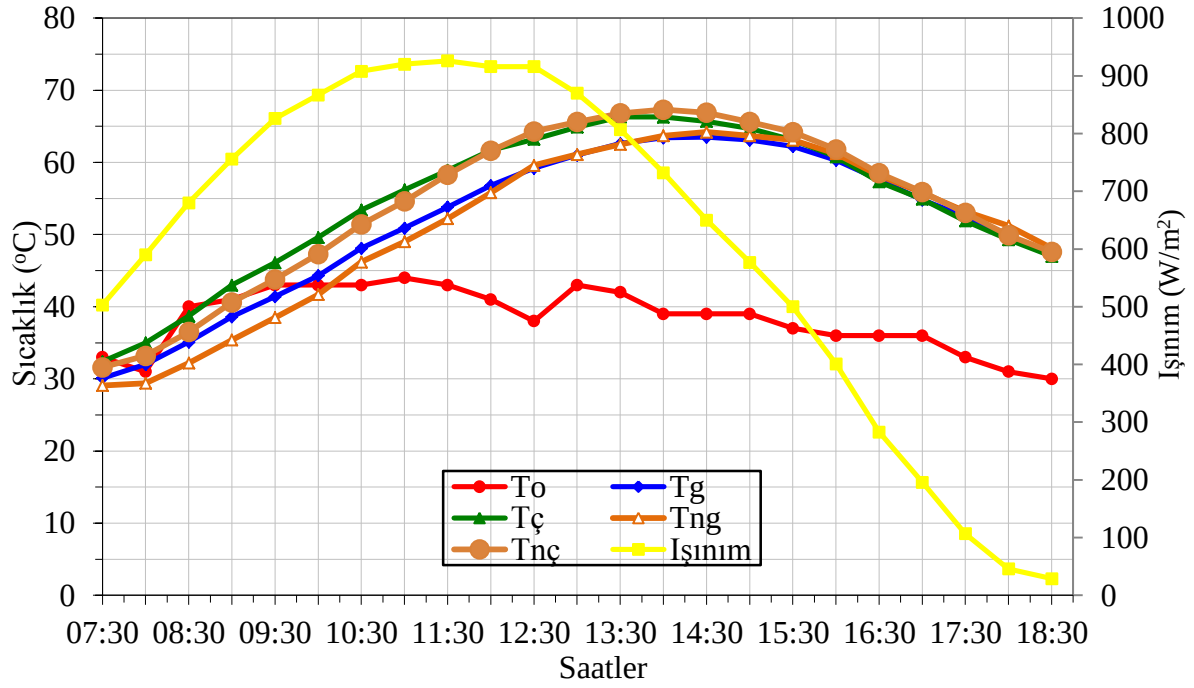
Şekil 3.29. % 0.2  $TiO_2$  hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler



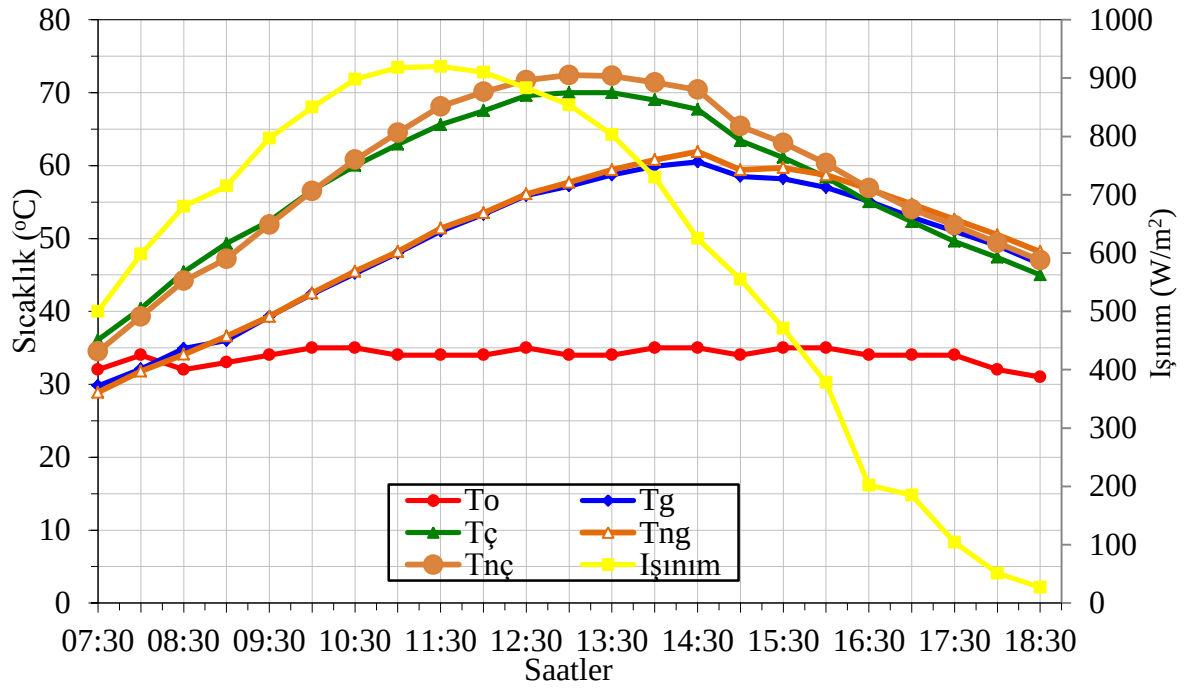
Şekil 3.30. % 0.2 TiO<sub>2</sub> hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler



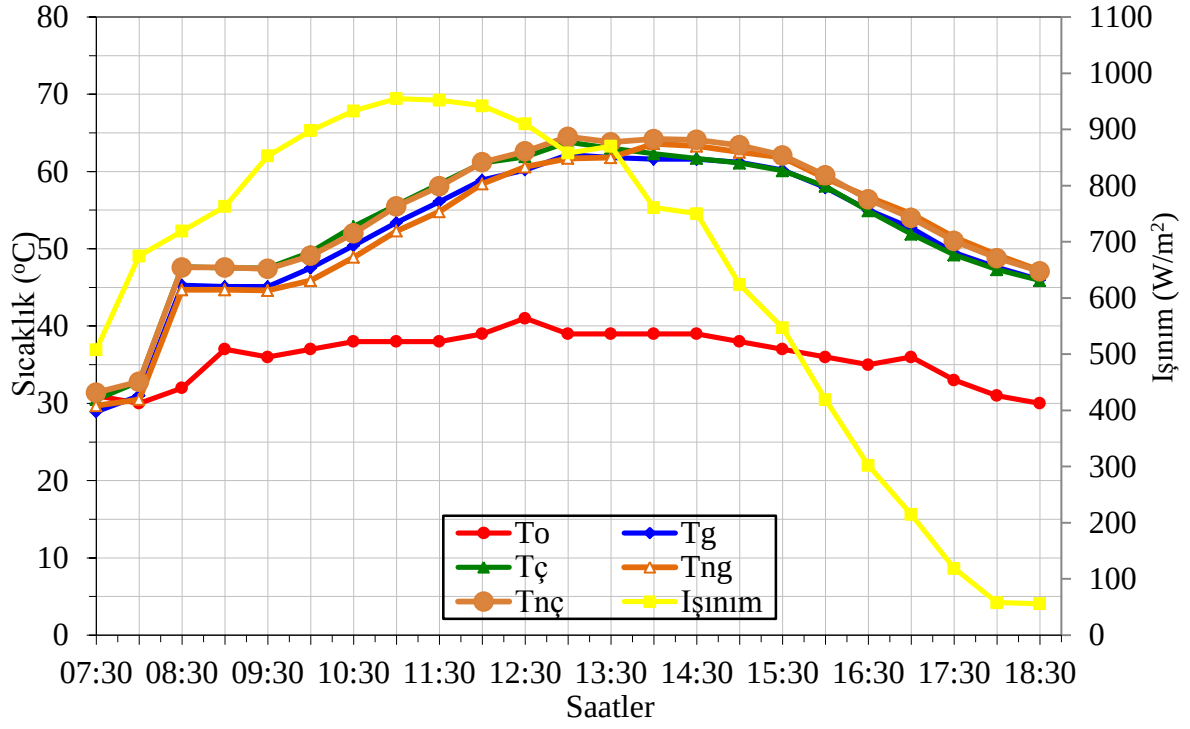
Şekil 3.31. % 0.4 TiO<sub>2</sub> hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler



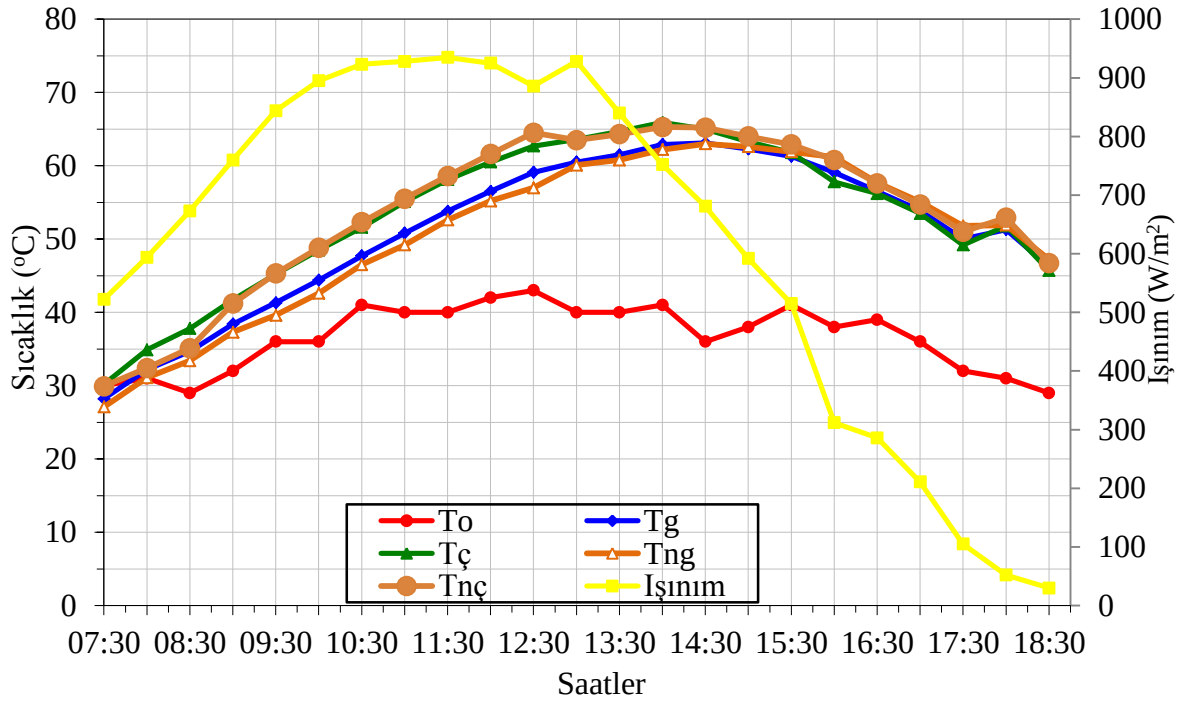
Şekil 3.32. % 0.4 TiO<sub>2</sub> hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler



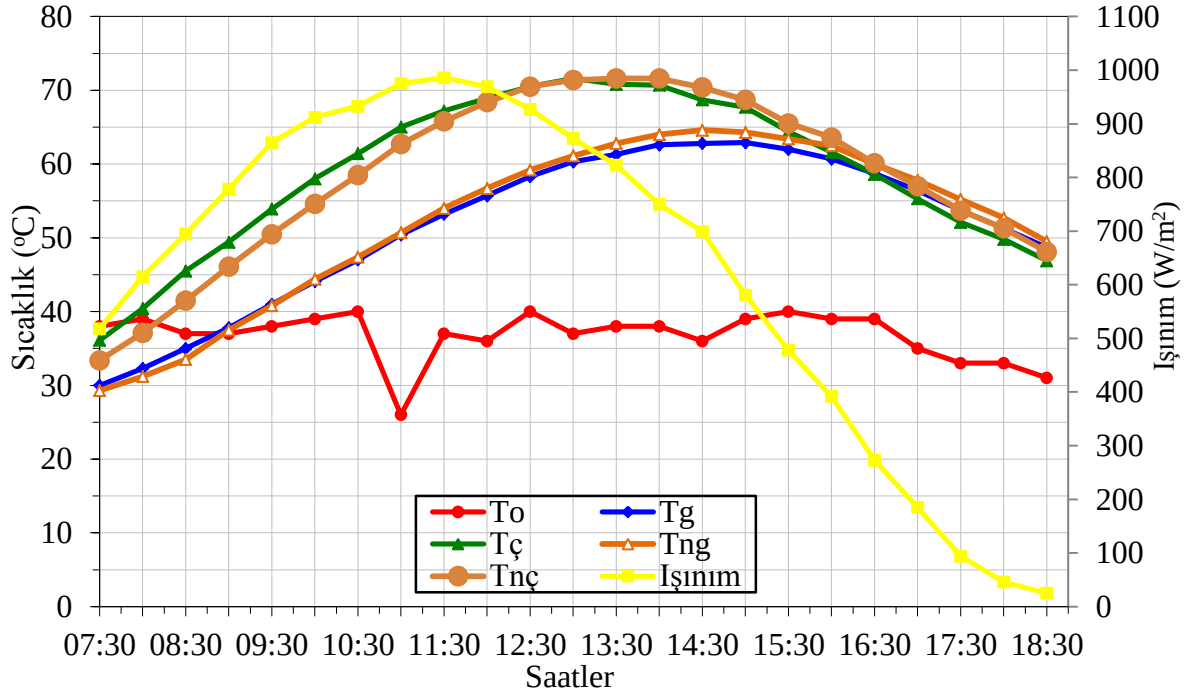
Şekil 3.33. % 0.4 TiO<sub>2</sub> hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler



Şekil 3.34. % 0.8 TiO<sub>2</sub> hacimsel oran ile 250 lt/h debi için deneysel veriler



Şekil 3.35. % 0.8 TiO<sub>2</sub> hacimsel oran ile 150 lt/h debi için deneysel veriler



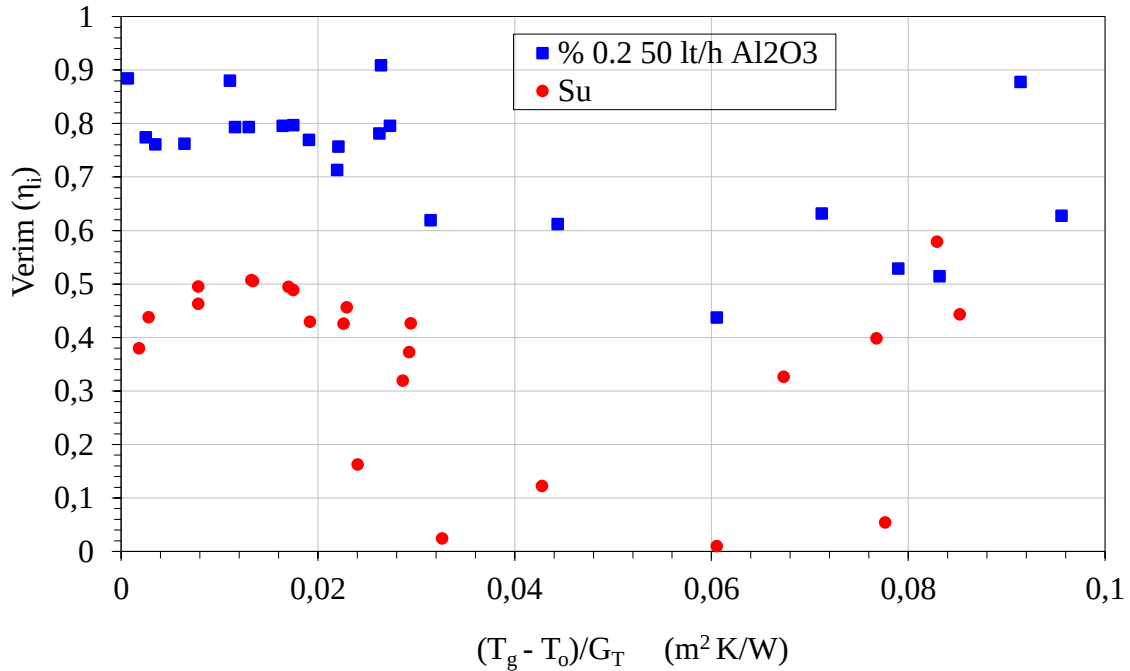
Şekil 3.36. % 0.8 TiO<sub>2</sub> hacimsel oran ile 50 lt/h debi için deneysel veriler

Verim ifadelerinde kullanılmak üzere gün içerisinde en iyi verilerin( bulutsuz ve sabit rüzgar hızında ) seçilerek hazırlandığı grafikler incelendiğinde; maksimum ışınlam değerlerinin 950-1065 W/m<sup>2</sup> aralığında ortalama olarak saat 11:00-12:30 arasında ölçülmüştür. Deneyler sırasında ortam sıcaklığı ortalama 30°C ile 45 °C arasında değişmektedir. Havadaki nem ortalama % 20 - % 40 aralığında, hız ise 5-10 m/s değerlerinde kaydedilmiştir. Suyun kullanıldığı sistemdeki ortalama kollektör giriş sıcaklıkları 30 °C ile 60 °C ve kollektör çıkış sıcaklıkları 35 °C ile 70 °C aralığında değişim göstermiştir. Nanoakışkanlı sistemde ise bu değerler sırasıyla 35 °C - 65 °C ve 40 °C - 75 °C aralığında olduğu ölçülmüştür.

### 3.3.2. Kollektör Verim - $[(T_g - T_o)/G_T]$ Değişimleri

ASHRAE 93-2003 standartına göre [124] bölüm 2.5.3.' te detaylı olarak verilen hesaplama yöntemiyle su ve nanoakışkanlı sistemler için yapılan hesaplamalar ile elde edilen Verim -  $[(T_g - T_o)/G_T]$  değişim grafikleri karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmiştir(Şekil 3.37.- Şekil 3.63.). Bütün grafiklerden, su yerine nanoakışkan kullanımının verimi arttırdığı net bir şekilde görülmüştür. Bu durum verim ifadesinde önemli olan iki parametrenin  $F_R(\tau\alpha)$  (absorbe edilen enerji) ve  $U_L$  (ısı kaybı)'nin karşılaştırılması ile açıklanabilir. Normal etki şartlarında,  $F_R(\tau\alpha)$ , absorbe edilen enerji parametresi, ölçülen sıcaklık aralığında sabit kabul edilebilir. Eşitlik 2.14' e göre verim ifadesi için grafikte düz bir çizgi elde edilir. Bu çizginin

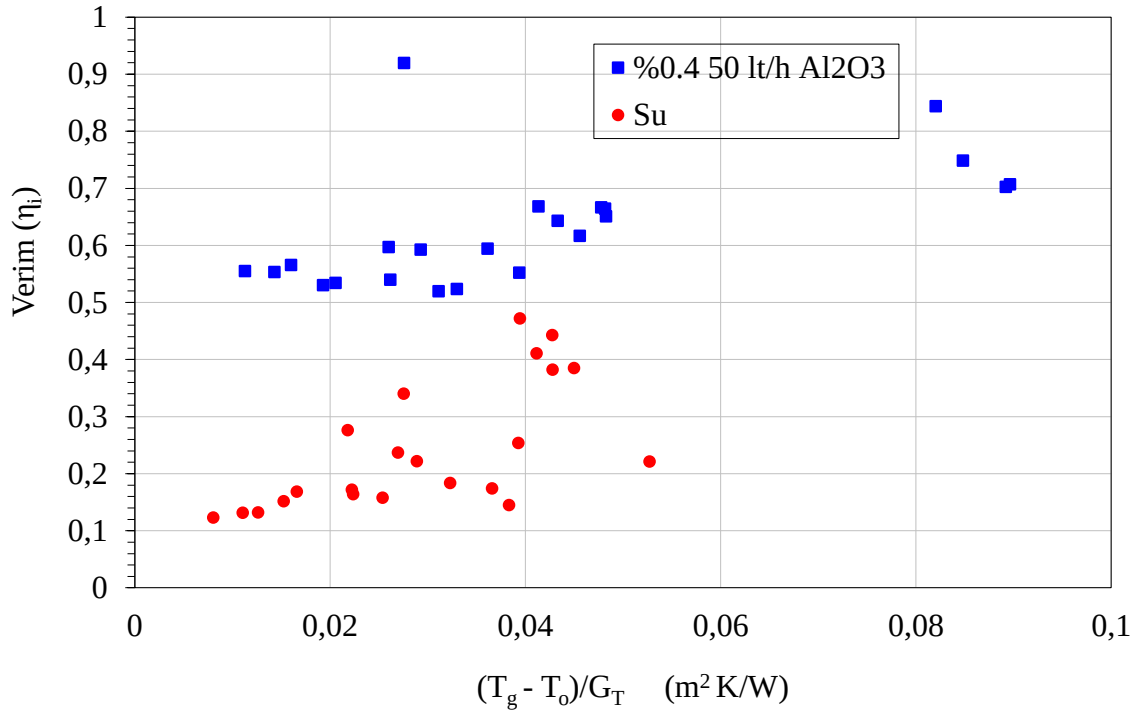
dikey eksen kestigi nokta verim değerini gosterir. Bu noktada kollektör giriş sıcaklığı ortam sıcaklığına eşittir ve bu nokta maksimum verim değerini gosterir. Bu çizginin eğimi de  $F_R U_L$  kollektörden ayrılan enerji parametresini gosterir. Absorbe edilen enerji parametresi yüksek iken kollektörden ayrılan enerji düşük ise verim artar. Şekil 3.37., şekil 3.40. ve şekil 3.43.'te görüldüğü gibi, % 0.2 hacimsel oranlı  $Al_2O_3$  -su ile yapılan deney sonuçlarında, kollektör maksimum verimi ( $T_g = T_o$ ), 50 lt/h' den 150 lt/h' e % 4.76 artarken; 250 lt/h debi değerinde sadece % 2.32 artmıştır. Enerji kayıp oranı ( $F_R U_L$ ), 250 lt/h debi değerinde minimum değerdedir. Düşük sıcaklık aralığında,  $(T_g - T_o)/G_T < 0.035$ , ışıının fazla olmasından dolayı 50 ve 150 lt/h debi değerlerinde verim daha yüksektir. Yüksek sıcaklık aralığında ise,  $(T_g - T_o)/G_T > 0.035$ , ısı kayıpları azaldığından 250 lt/h debi değerinde verim daha yüksektir. Düşük debilerde, akışkanın kollektörde kalma süresi yani güneş absorbe etme ( $F_R(\tau\alpha)$ ) süresi fazla olduğundan daha fazla sıcaklık artışı sağlanır. Fakat ışıının yayınımlı, sıcaklığın dördüncü dereceden kuvveti ile ilişkili olduğundan çok düşük hızlarda akışkan daha fazla yayıcı kayıplara maruz kaldığından verim daha düşüktür. Isı transfer oranı bu iki parametreden etkilenmektedir. Çok yüksek hızlarda, akışkanın sıcaklık artışı çok küçük olduğundan kollektör verimi debiden bağımsızdır[126].



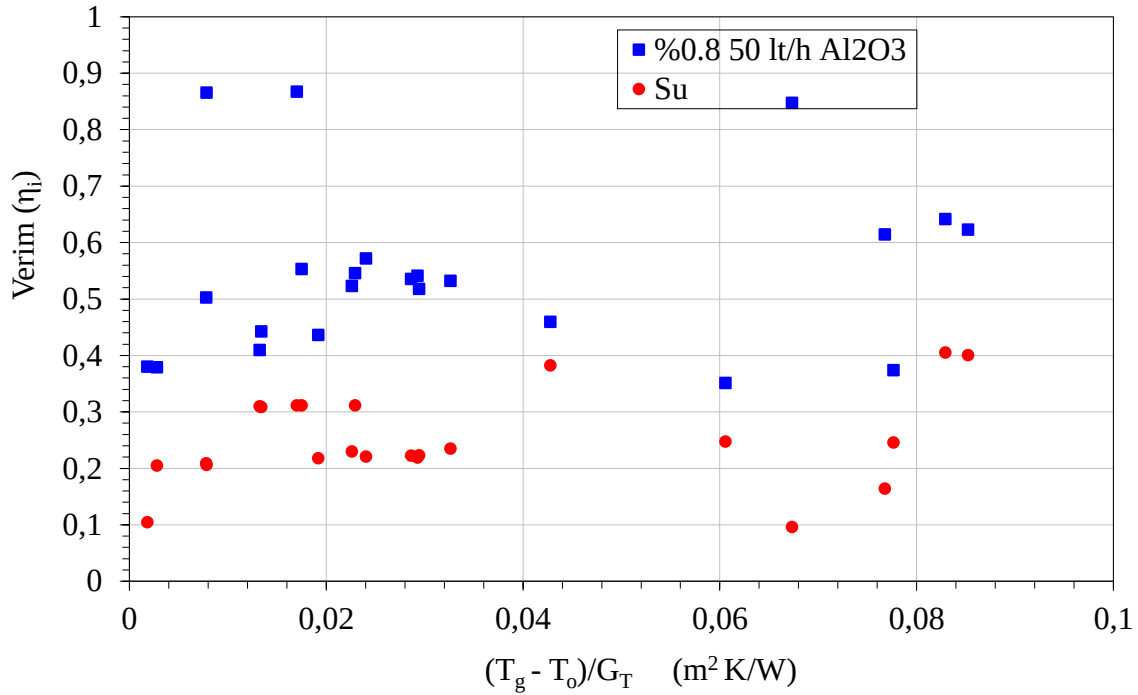
Şekil 3.37. % 0.2  $Al_2O_3$ -su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

% 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlardaki  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarıyla ve sadece su kullanılan sistemdeki deneysel sonuçların karşılaştırmalı verildiği Şekil 3.37., Şekil 3.38. ve

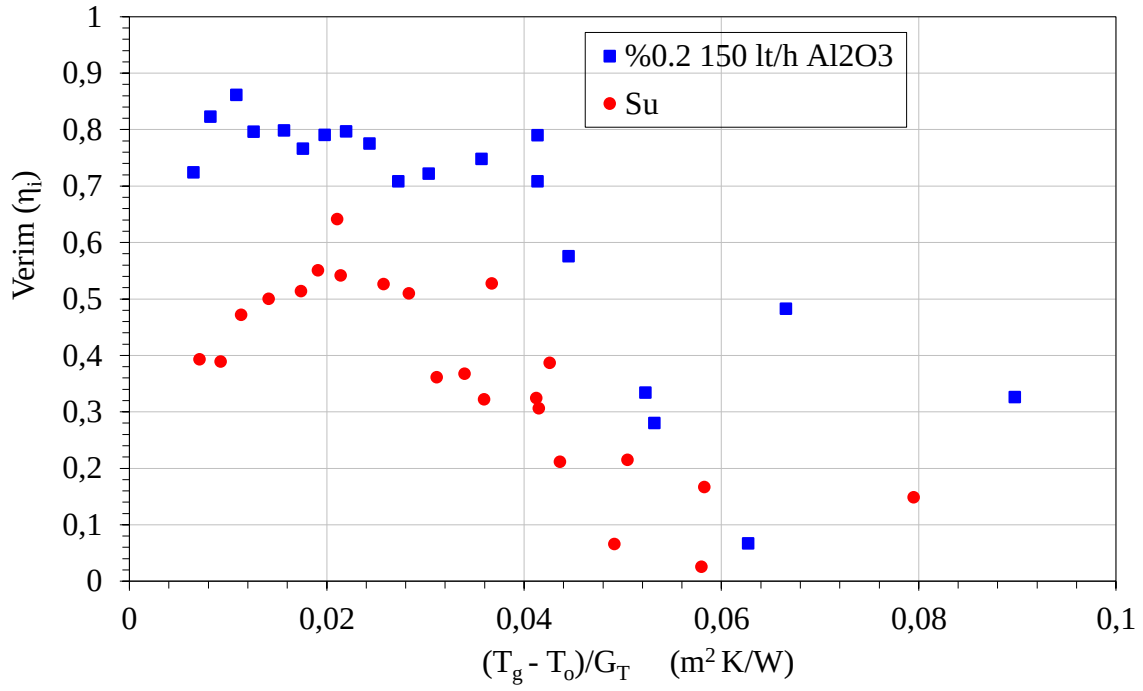
Şekil 3.39.'a göre; her üç oranda da nanoakışkan kullanımının suya göre daha verimli olduğu görülmüştür.



Şekil 3.38. % 0.4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

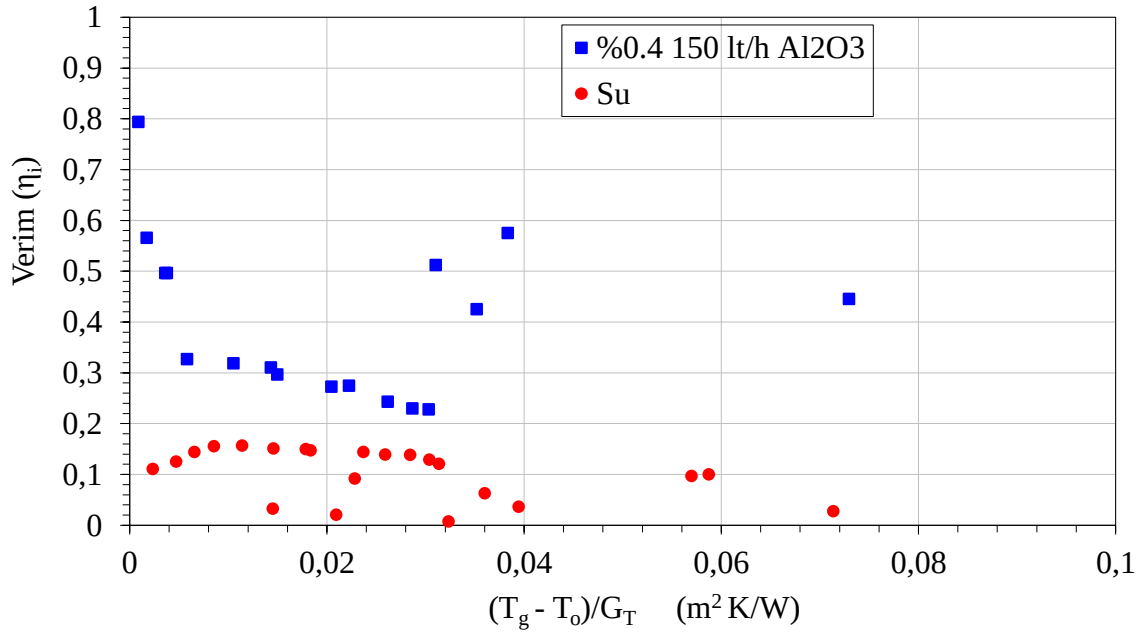


Şekil 3.39. % 0.8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

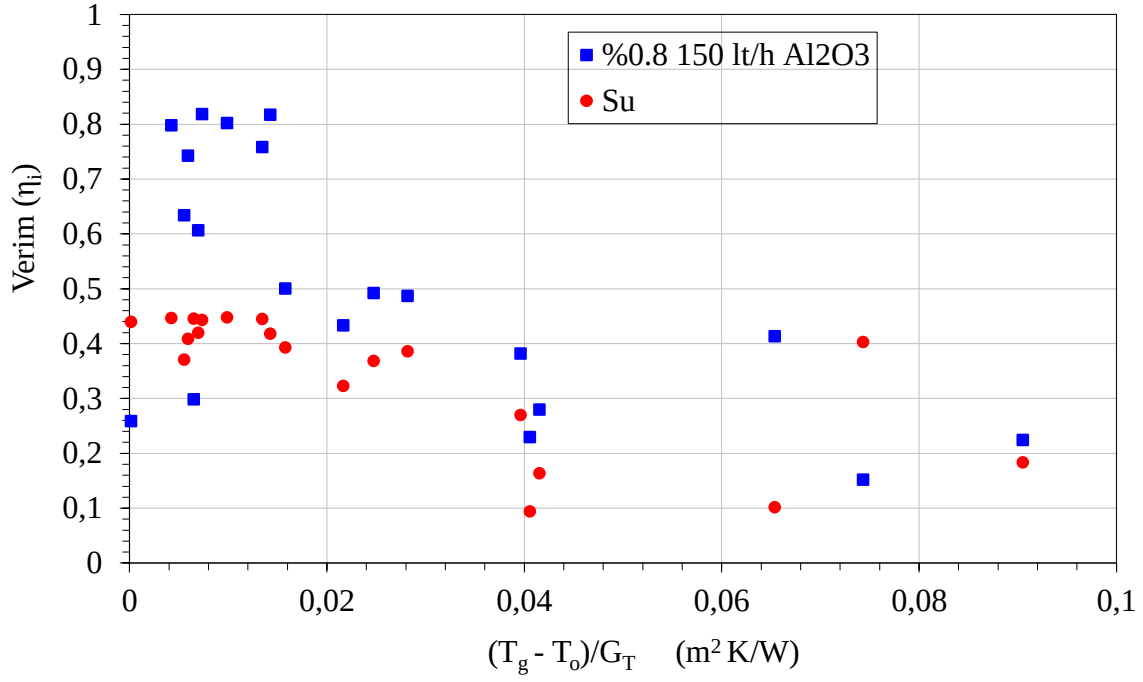


Şekil 3.40. % 0.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

Hacimsel oran % 0.2' den % 0.4' e artarken ısı verim, geniş bir sıcaklık farkı aralığında azalmaktadır. Ancak % 0.8 oranı için,  $(T_g - T_o)/G_T > 0.035$  değerinde baskın parametre olan  $F_R U_L$ , daha düşük olduğundan verim daha düşüktür.

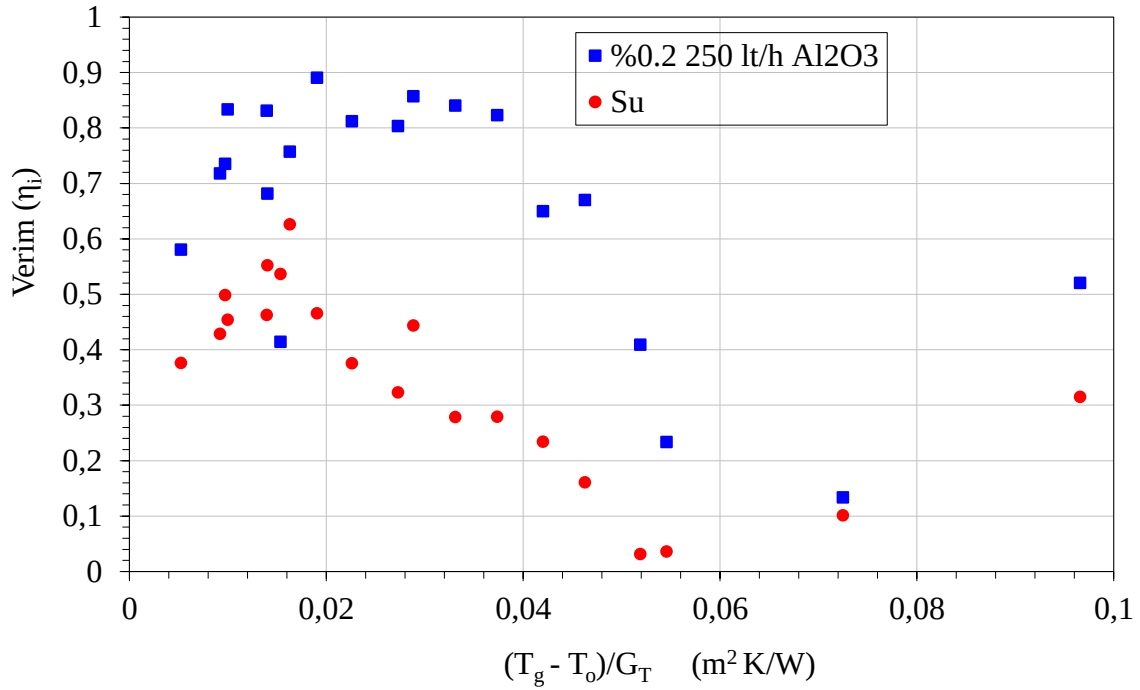


Şekil 3.41. % 0.4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

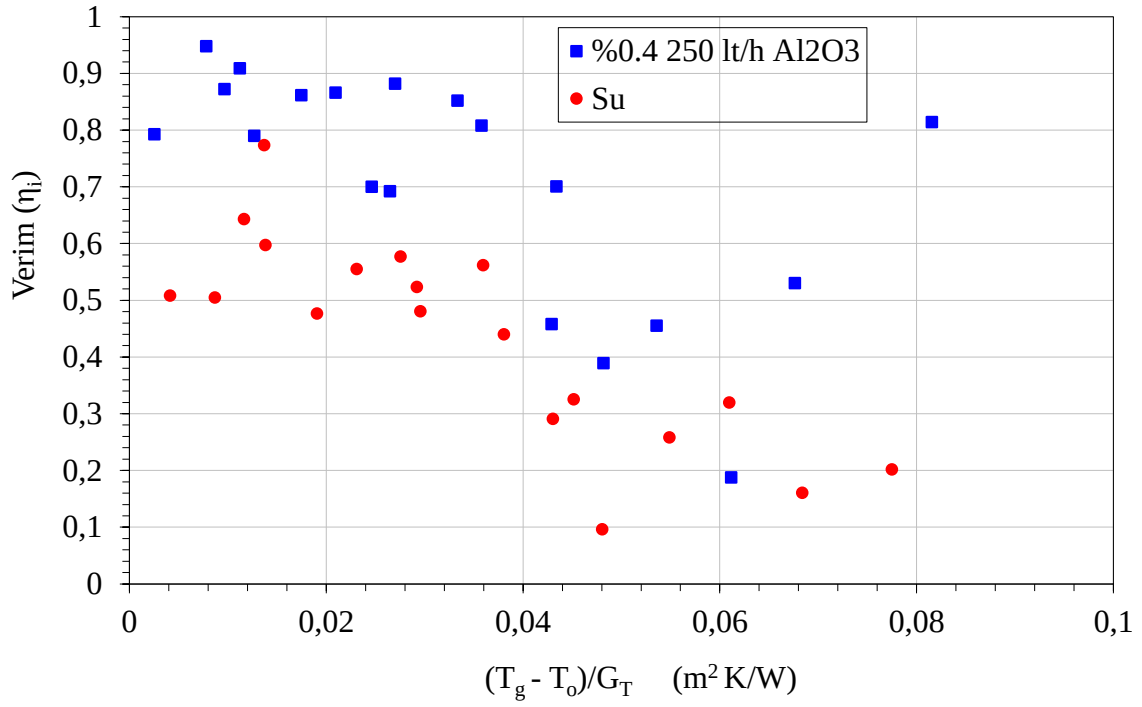


Şekil 3.42. % 0.8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

Yüksek konsantrasyonlu homojen solüsyonlarda nanopartiküller çökmeye daha meyilli olduklarından solüsyon kararlılığı azalmaktadır. Dolayısıyla düşük sıcaklık farklarında, % 0.2' nin ısıl iletkenlikteki artış oranı % 0.4 ve % 0.8' inine göre daha fazladır.

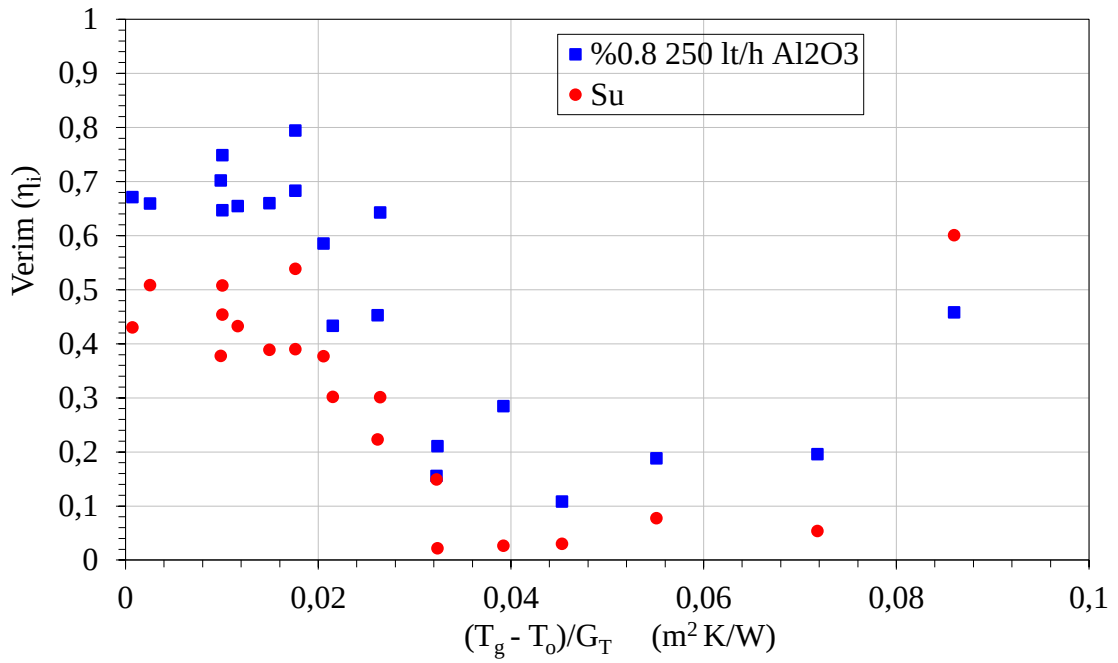


Şekil 3.43. % 0.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi



Şekil 3.44. % 0.4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_0)/G_T$  değişimi

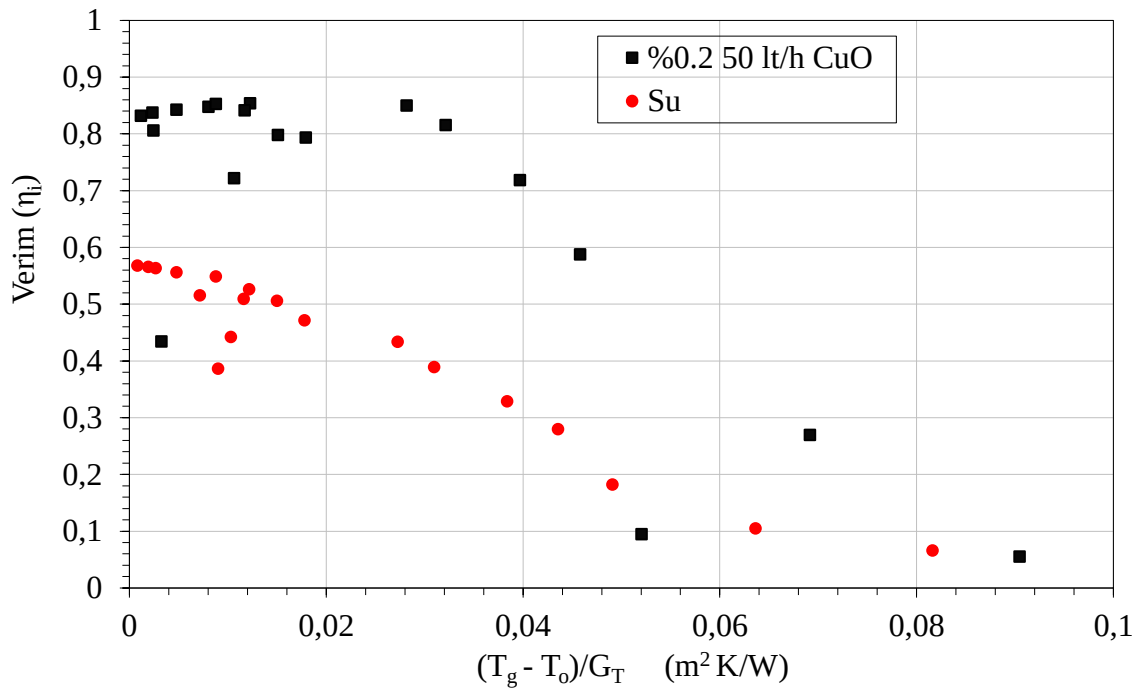
Ancak yüksek sıcaklıklar moleküllerin hareketini arttırdığından nanopartikül ile akışkanın çarpışmalarını artırır.



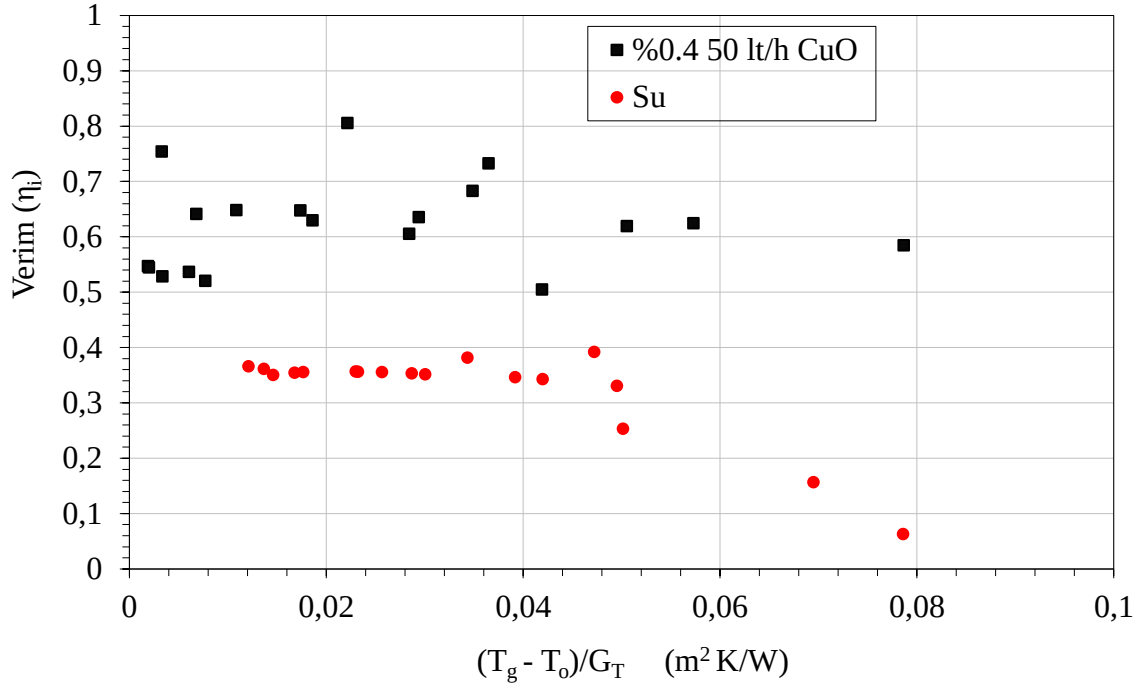
Şekil 3.45. % 0.8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_0)/G_T$  değişimi

Nanoakışkanların ısıl iletkenlik artışıdaki temel unsur partiküller arasındaki bu rastgele çarpışmalardır. Dolayısıyla konsantrasyon oranı arttıkça sıcaklık artışının etkisi önem kazanmaktadır[87]. Küçük sıcaklık değişimleri için kollektördeki akışkan sıcaklığındaki artış aynı zamanda ısı kaybının artmasına yol açar. Dolayısıyla yüksek sıcaklık farklarında % 0.8 oran için % 0.2 ve % 0.4 ‘ e göre ısı kaybı azalır ve verim artar. Şekil 3.40., Şekil 3.41. ve Şekil 3.42.’e göre; % 0.4 hacimsel oranlı  $Al_2O_3$ -su ile yapılan deney sonuçlarında, kollektör maksimum verimi ( $T_g = T_o$ ), 50 lt/h’ den 150 lt/h’ e % 6.32 artarken; 250 lt/h debi değerinde sadece % 4.34 artmıştır. Şekil 3.43., Şekil 3.44. ve Şekil 3.45.’e göre; % 0.8 hacimsel oranlı  $Al_2O_3$  -su ile yapılan deney sonuçlarında, kollektör maksimum verimi ( $T_g = T_o$ ), 50 lt/h’ den 150 lt/h’ e % 2.43 artarken; 250 lt/h debi değerinde ise % 2.38 artmıştır.

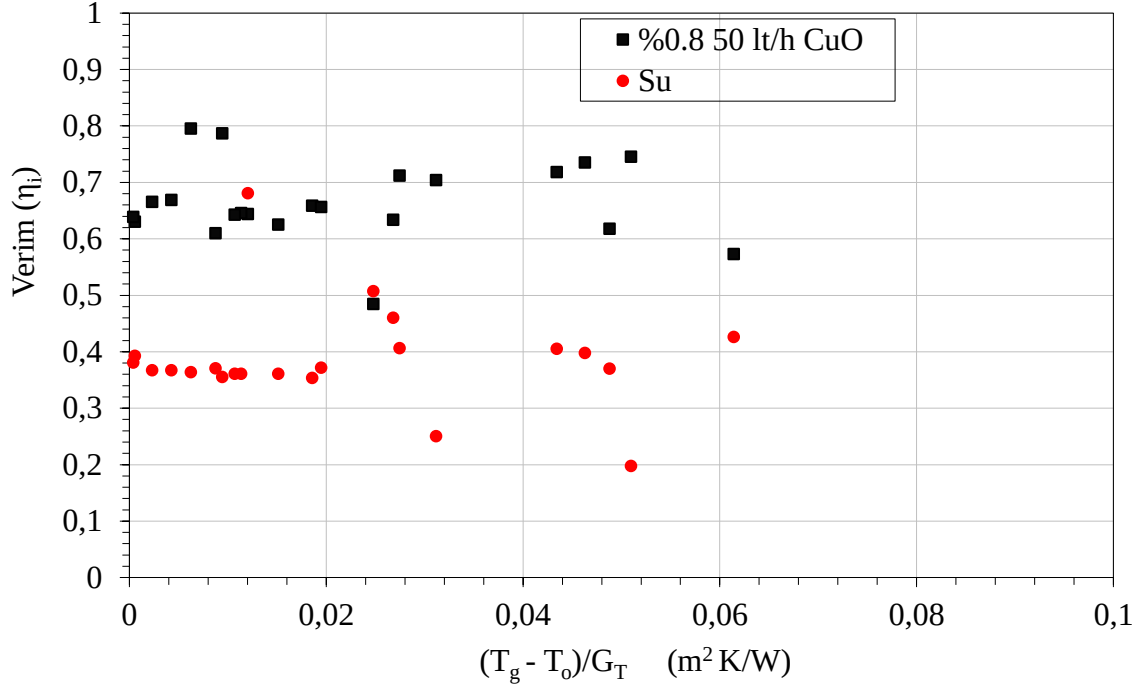
Şekil 3.46., Şekil 3.47. ve Şekil 3.48.’teki grafikler incelendiğinde,  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı için yapılan tespitler CuO-su karışımları için de söylenebilir.



Şekil 3.46. % 0.2 CuO-su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

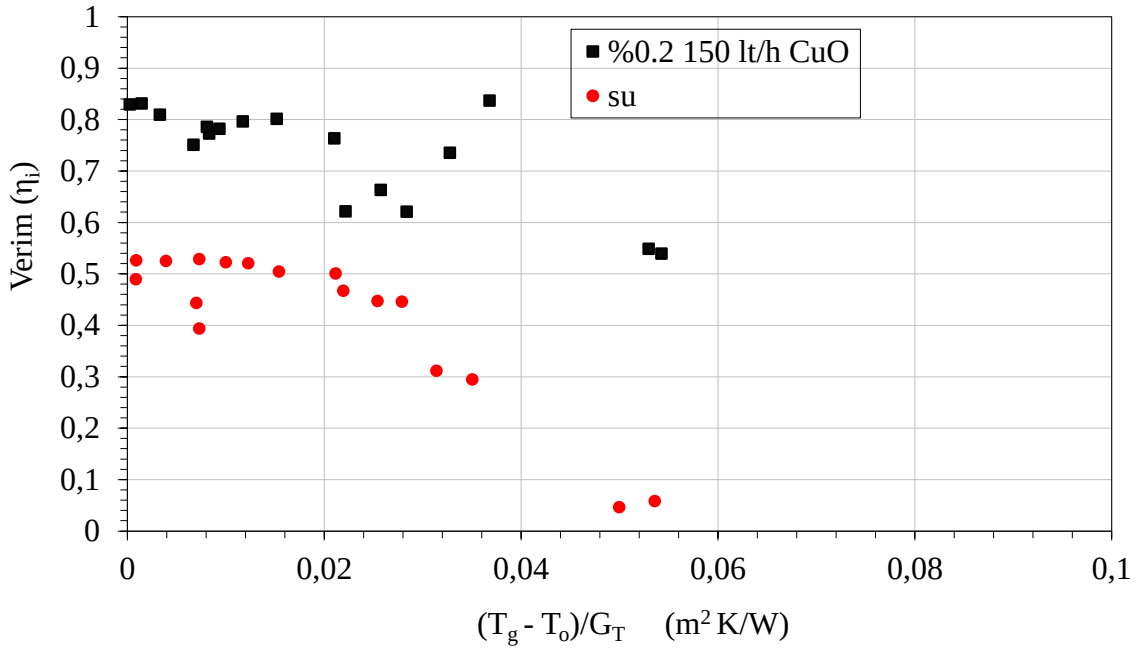


Şekil 3.47. % 0.4 CuO-su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

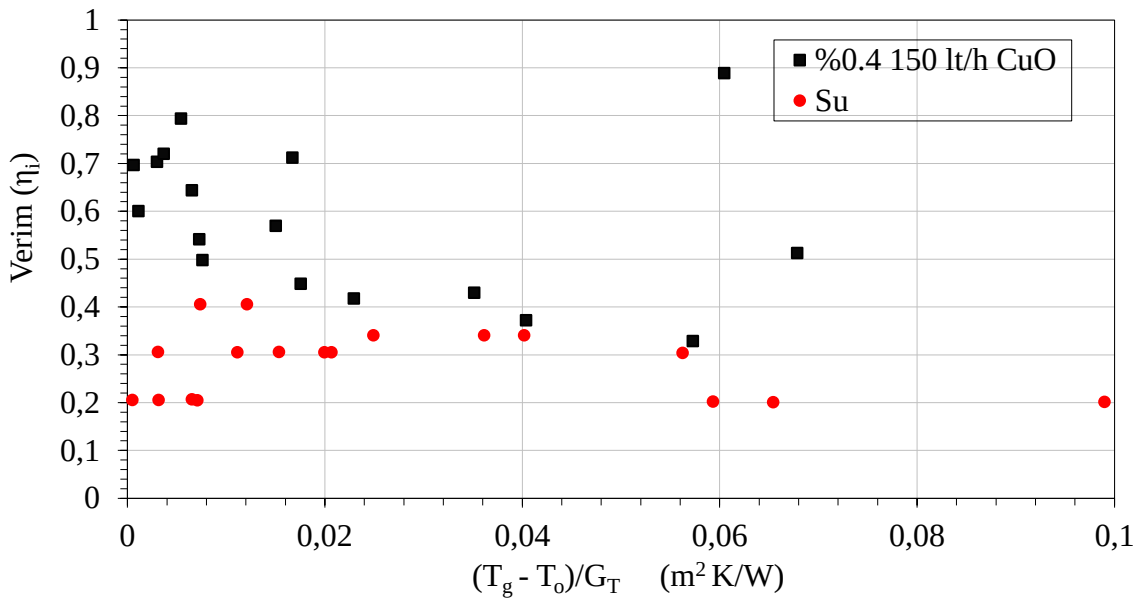


Şekil 3.48. % 0.8 CuO-su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

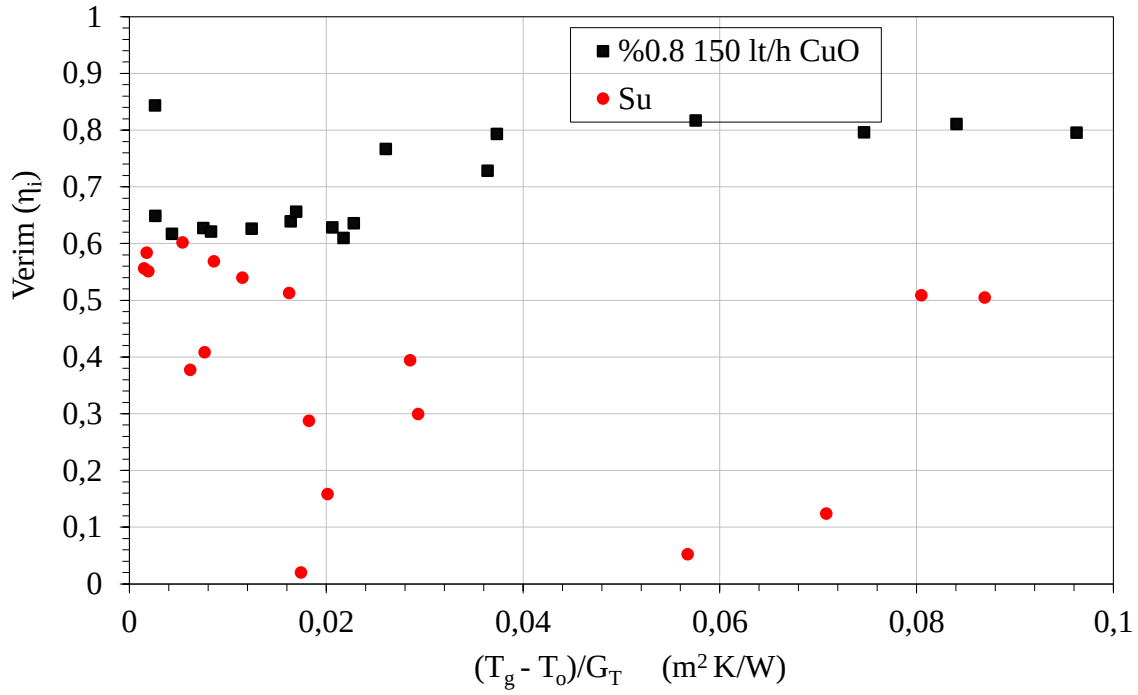
Hacimsel oran % 0.2' den % 0.4' e artarken ısı verim, geniş bir sıcaklık farkı aralığında azalmaktadır. Ancak % 0.8 oranı için,  $(T_g - T_o)/G_T > 0.035$  değerinde baskın parametre olan  $F_R U_L$  ,daha düşük olduğundan verim daha düşüktür. Şekil 3.46., şekil 3.49. ve şekil 3.52.'te görüldüğü gibi, % 0.2 hacimsel oranlı CuO-su ile yapılan deney sonuçlarında, kolektör maksimum verimi ( $T_g = T_o$ ), 50 lt/h' den 150 lt/h' e % 7.22 artarken; 250 lt/h debi değerinde sadece % 1.20 artmıştır.



Şekil 3.49. % 0.2 CuO-su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

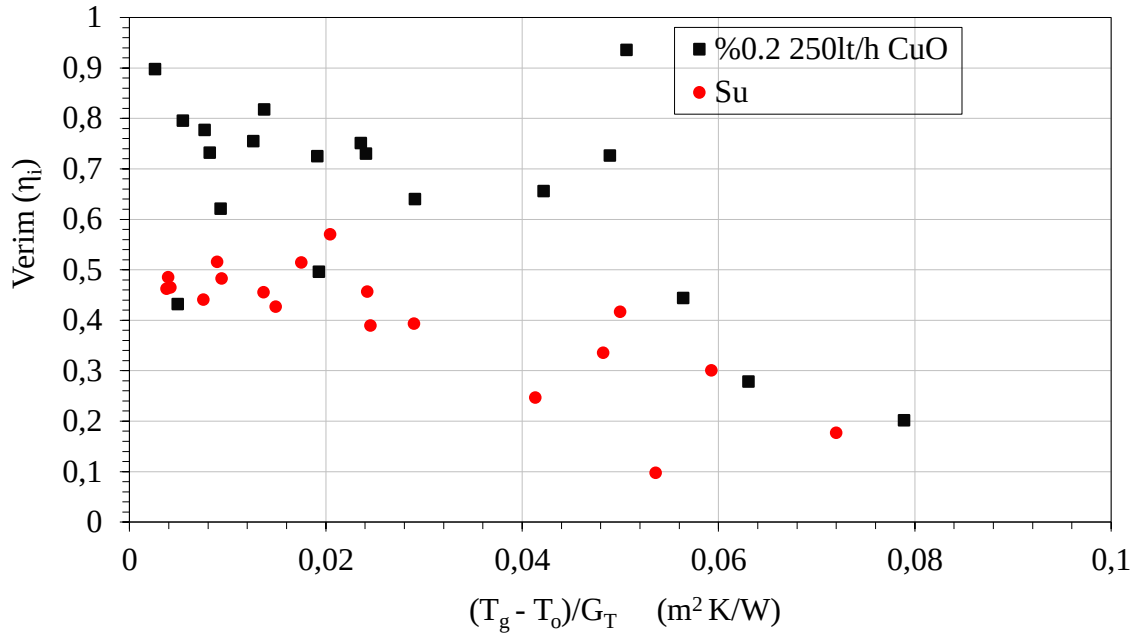


Şekil 3.50. % 0.4 CuO-su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

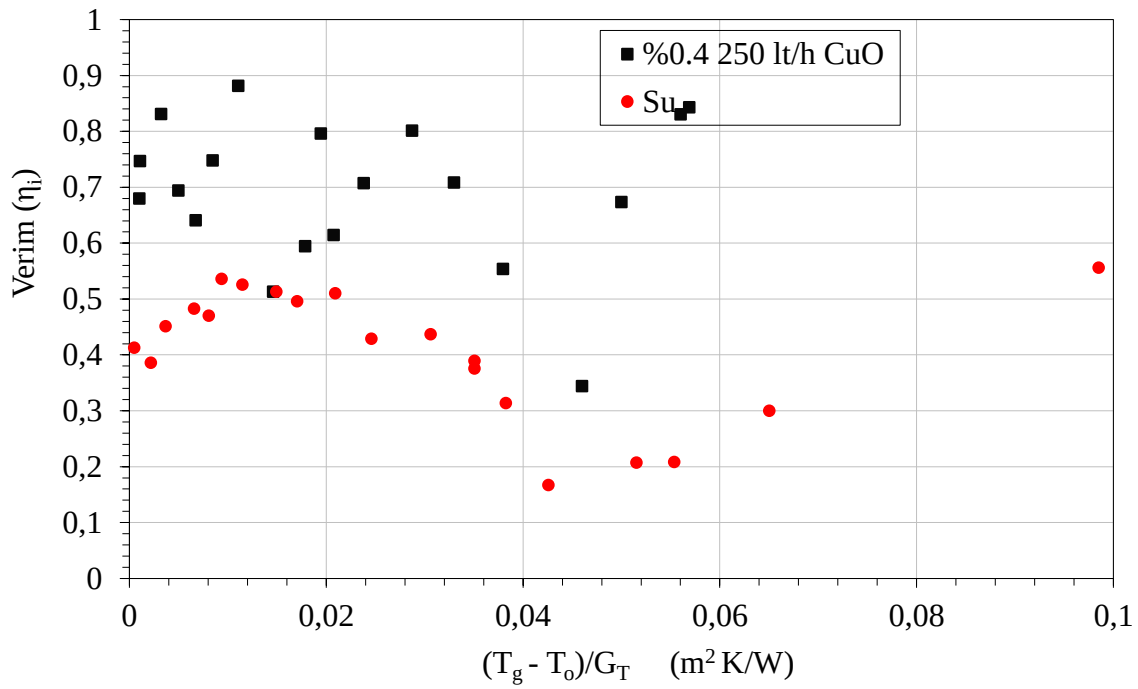


Şekil 3.51. % 0.8 CuO-su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

% 0.4 hacimsel oranlı CuO -su ile yapılan deney sonuçlarında, kollektör maksimum verimi ( $T_g = T_o$ ), 50 lt/h' den 150 lt/h' e % 9.28 artarken; 250 lt/h debi değerinde sadece % 3.80 artmıştır.

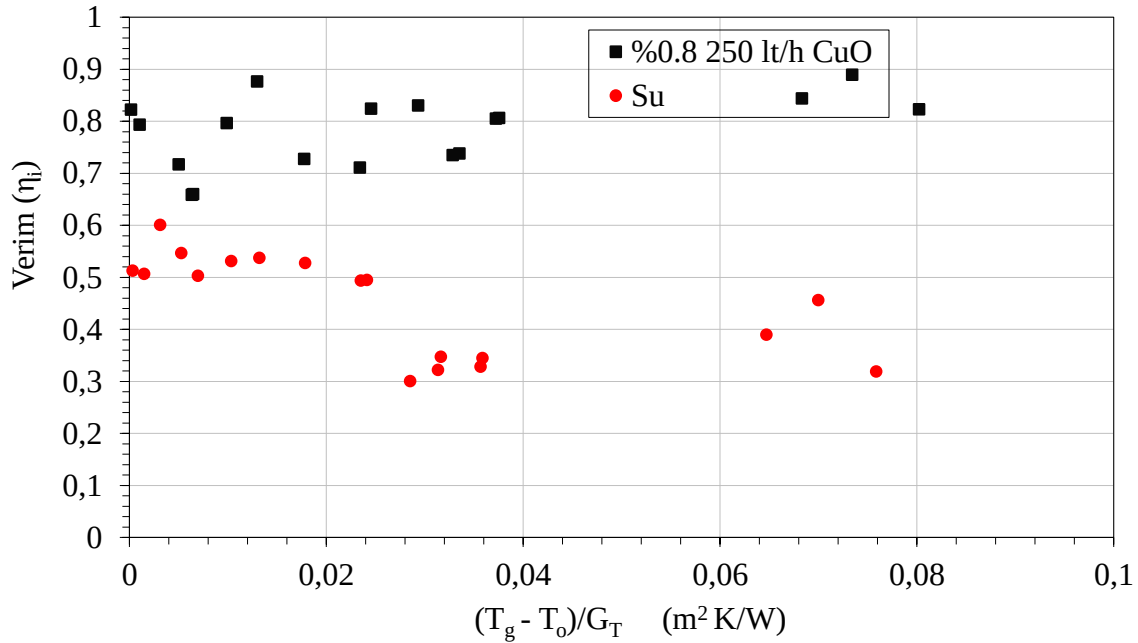


Şekil 3.52. % 0.2 CuO-su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi



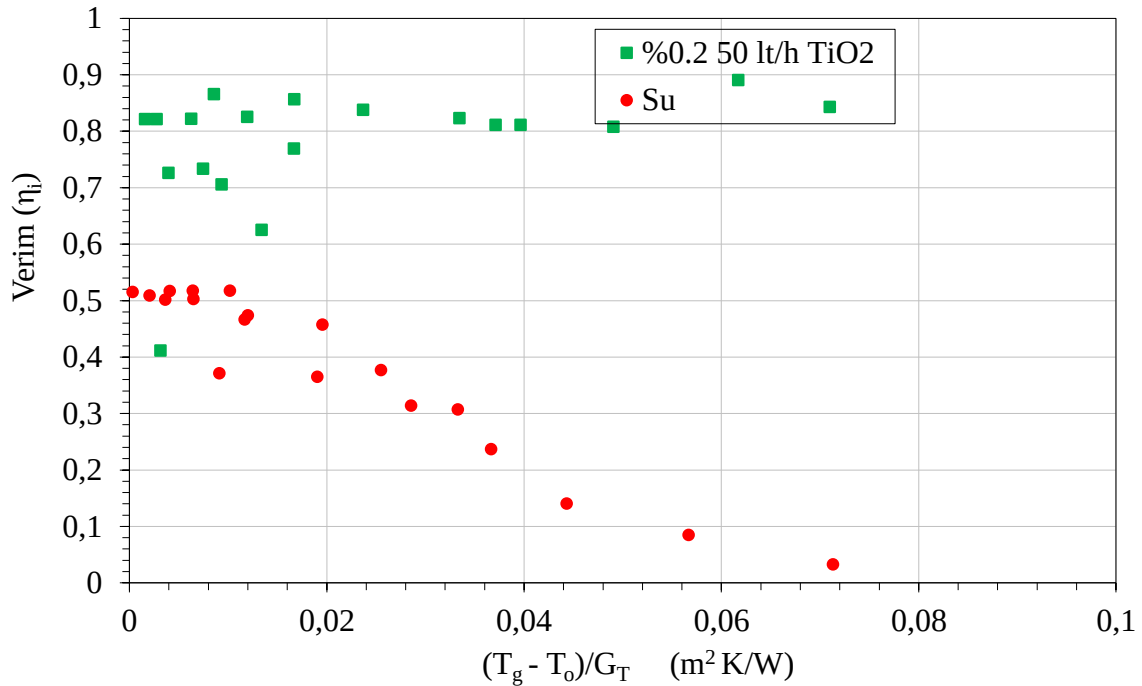
Şekil 3.53. % 0.4 CuO-su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

% 0.8 hacimsel oranlı CuO -su ile yapılan deney sonuçlarında, kollektör maksimum verimi ( $T_g = T_o$ ), 50 lt/h' den 150 lt/h' e % 5.34 artarken; 250 lt/h debi değerinde sadece % 0.71 artmıştır. Burdan, debideki değişimin kesin bir davranış sergilemediği sonucu çıkarılabilir[92].



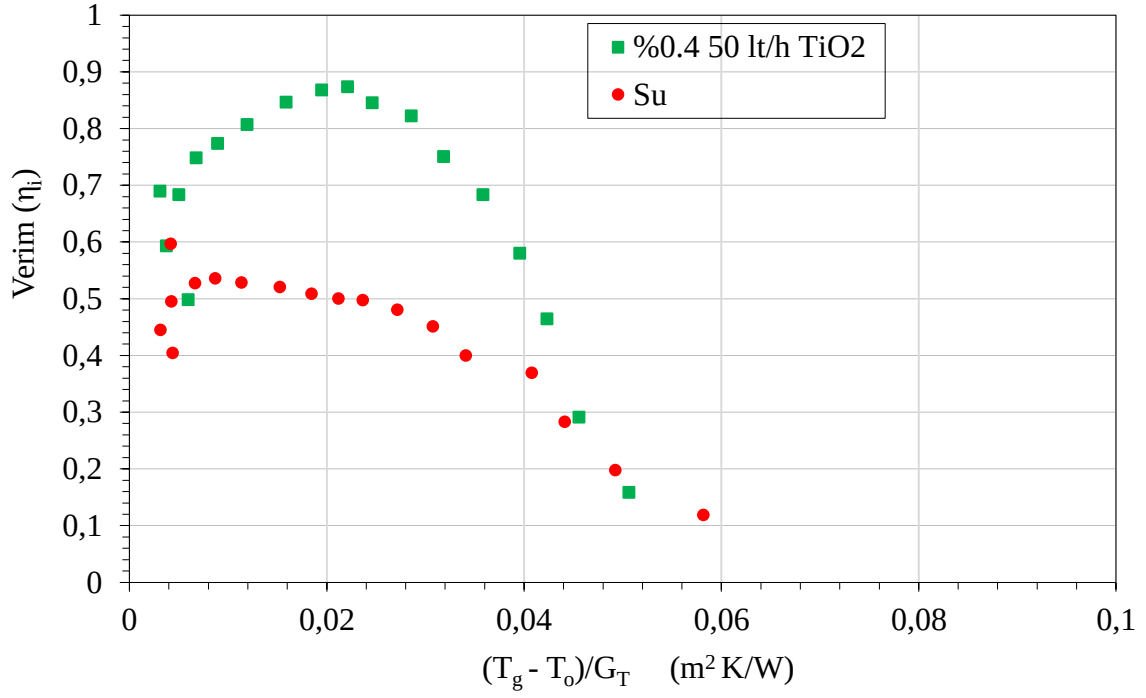
Şekil 3.54. % 0.8 CuO-su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

Şekil 3.55., Şekil 3.56. ve Şekil 3.57.’deki grafikler incelendiğinde,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su ve  $\text{CuO}$ -su sıvıları için elde edilen sonuçlar  $\text{TiO}_2$ -su nanoakışkanı için de söylenebilir. Benzer şekilde % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlardaki  $\text{TiO}_2$ -su nanoakışkanlarıyla ve sadece su kullanılan sistemdeki deneysel sonuçların karşılaştırmalı verildiği grafikler incelendiğinde her üç oranda da nanoakışkan kullanımının suya göre daha verimli olduğu görülmüştür. Bunun sebebi; boru yüzeyine yakın nanopartiküllerin hareketi ve difüzyonun yol açtığı duvardan nanoakışkana olan hızlı ısı transferidir. Ayrıca sıvı içindeki nanopartiküllerin diğer önemli etkisi; nanopartiküllerin Brownian hareketi ve dalgalanmasıyla akış seyrini değiştirerek sıvı hacmi içindeki taşınım ısı transferinin gelişimini sağlayan düzleştirilmiş enine sıcaklık gradyanlı yarı türbülanslı rejim oluşturmaktır. Fakat daha yüksek Reynolds sayılarında bu mekanizma baskın değildir. Diğer bir deyişle yüksek debilerde ısı transfer katsayısının, sıvının ısıl iletkenliği ile hiçbir önemli bağımlılığı yoktur. Bu nedenle ısıl iletkenliğin etkisi daha az belirgin olur. Yani nanopartiküller daha yüksek Reynolds sayıları için ısı transfer iyileşme oranı azalır[127]. % 0.2 hacimsel oranlardaki  $\text{TiO}_2$ -su karışımı için kollektör maksimum verimi ( $T_g = T_o$ ), 50 lt/h’ den 150 lt/h’ e % 10.25 artarken; 250 lt/h debi değerinde sadece % 3.48 artmıştır. Enerji kayıp oranı ( $F_R U_L$ ), 250 lt/h debi değerinde minimum değerdedir.

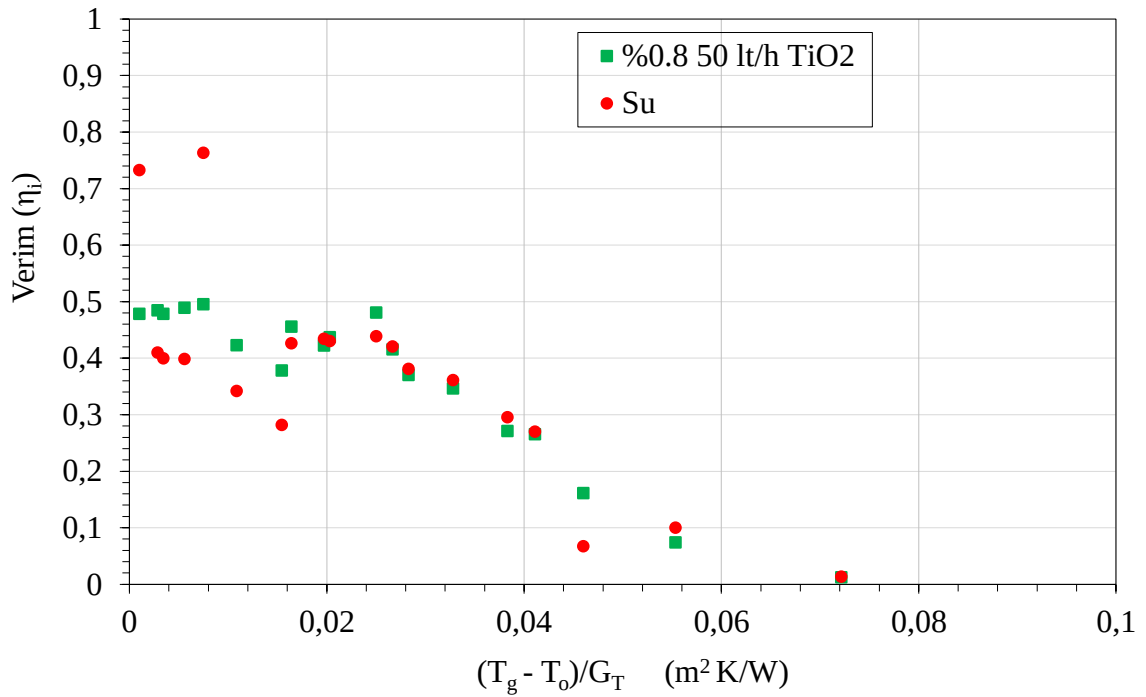


Şekil 3.55. % 0.2  $\text{TiO}_2$ -su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

% 0.4 hacimsel oranlardaki  $\text{TiO}_2$ -su karışımı için kolektör maksimum verimi ( $T_g = T_o$ ), 50 lt/h' den 150 lt/h' e % 1.17 artarken; 250 lt/h debi değerinde % 1.15 artmıştır.

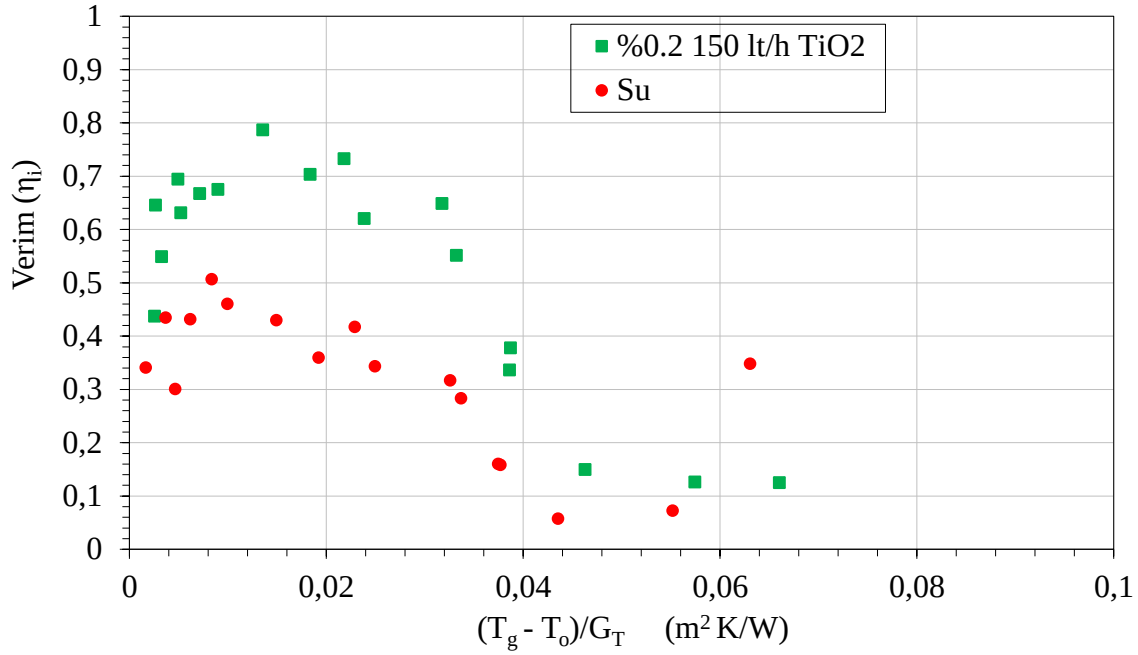


Şekil 3.56. % 0.4  $\text{TiO}_2$ -su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

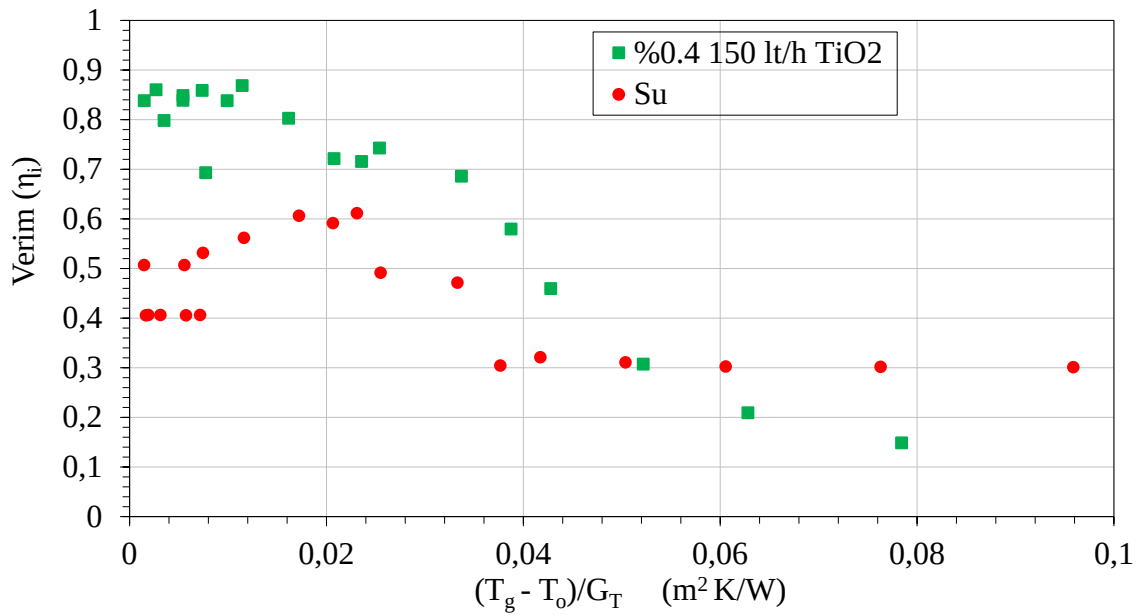


Şekil 3.57. % 0.8  $\text{TiO}_2$ -su hacimsel oran ile 50 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

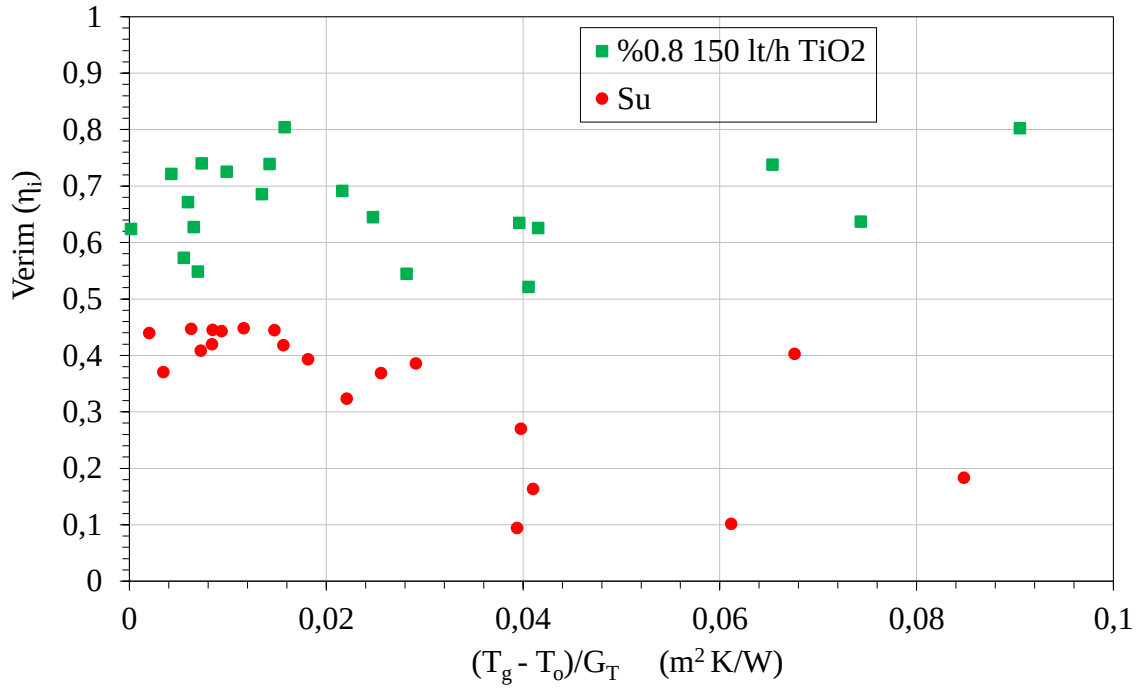
% 0.8 hacimsel oranlardaki  $\text{TiO}_2$ -su karışımı için kolektör maksimum verimi ( $T_g = T_o$ ), 50 lt/h' den 150 lt/h' e % 19.17 artarken; 250 lt/h debi değerinde % 2.35 artmıştır. Hacimsel oran % 0.2' den % 0.4' e artarken ısı verim, geniş bir sıcaklık farkı aralığında azalmaktadır. Ancak % 0.8 oranı için,  $(T_g - T_o)/G_T > 0.035$  değerinde baskın parametre olan  $F_R U_L$ , daha düşük olduğundan verim daha düşüktür.



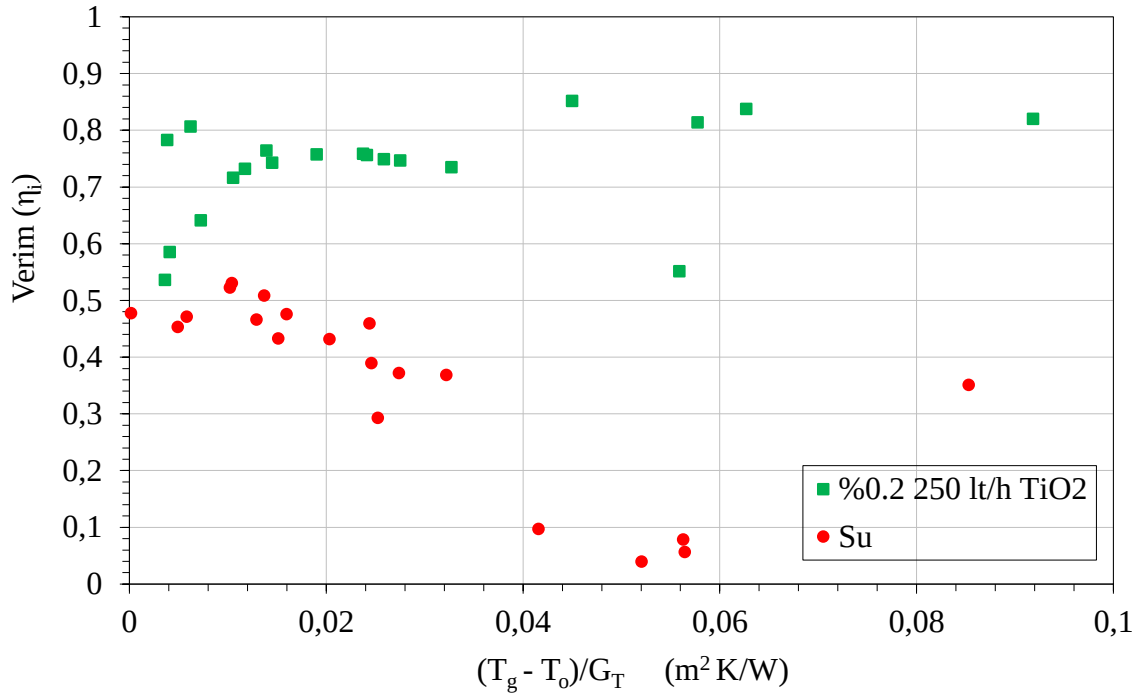
Şekil 3.58. % 0.2  $\text{TiO}_2$ -su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi



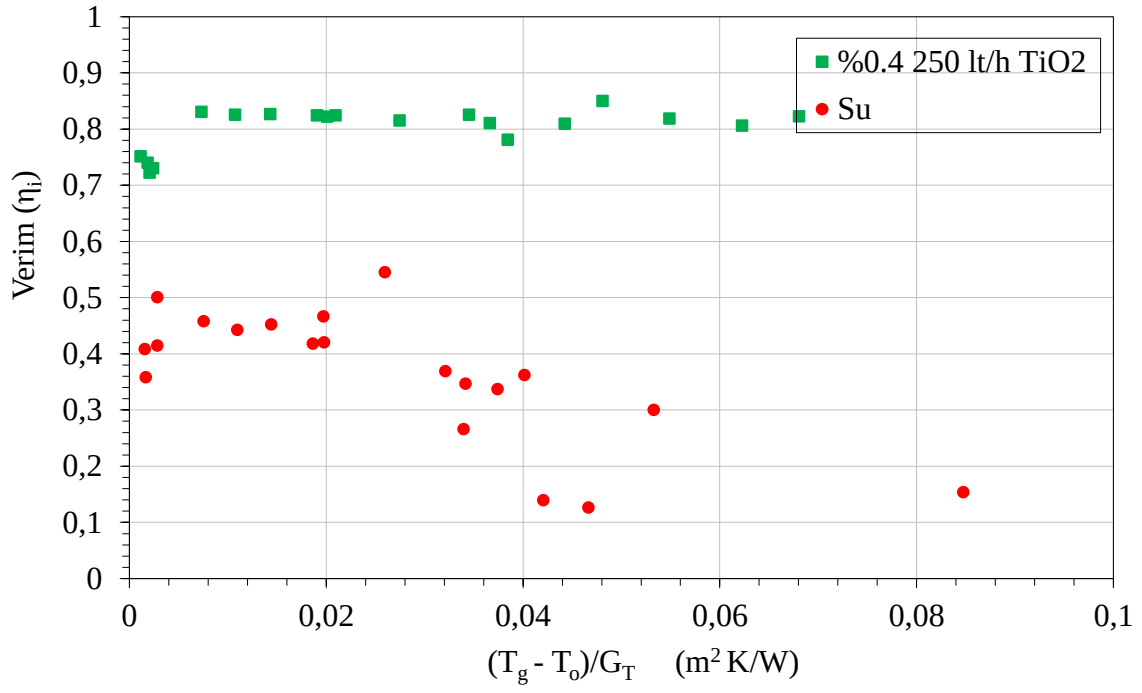
Şekil 3.59. % 0.4  $\text{TiO}_2$ -su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi



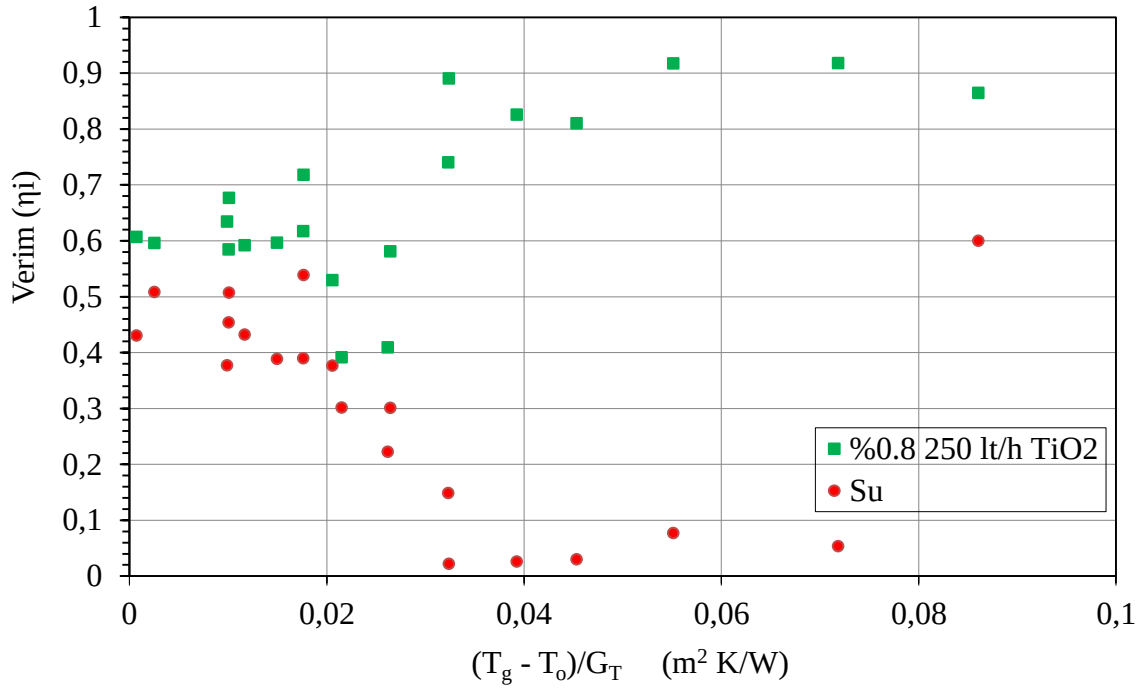
Şekil 3.60. % 0.8  $TiO_2$ -su hacimsel oran ile 150 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi



Şekil 3.61. % 0.2  $TiO_2$ -su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi



Şekil 3.62. % 0.4 TiO<sub>2</sub>-su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi



Şekil 3.63. % 0.8 TiO<sub>2</sub>-su hacimsel oran ile 250 lt/h debi için verim -  $(T_g - T_o)/G_T$  değişimi

Her üç karışım için grafikler incelendiğinde; bütün debi değerleri göz önüne alındığında  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su için % 0.2, % 0.4 ve % 0.8' lik konsantrasyonlarda suya göre sırasıyla verimde maksimum % 71, % 63 ve % 61.1 artış sağlanmıştır. Bu değerler CuO-su için sırasıyla maksimum % 87.8, % 84.61 ve % 73.1 artış olarak hesaplanmıştır. Son olarak  $\text{TiO}_2$ -su için sırasıyla maksimum % 52.5, % 47.6 ve % 35.7 artış elde edilmiştir. Dolayısıyla verimdeki en fazla artışın CuO-su nanoakışkanında, en az artışın ise  $\text{TiO}_2$ -su karışımında meydana geldiği söylenebilir. Bunun sebebi olarak nanopartiküllerin ısı iletkenlik katsayıları gösterilebilir.

#### 4.SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada düzlemsel güneş kolektörlü sıcak su güneş enerji sisteminde % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlarda hazırlanan  $Al_2O_3$ -saf su,  $TiO_2$ -saf su ve  $CuO$ -saf su nanoakışkanı kullanılması durumunda verim ifadesi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler 50 lt/h, 150 lt/h ve 250 lt/h debi değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Temel akışkanın termofiziksel özellikleri, partikül eklenmesi ile önemli ölçüde değişmektedir. Partikül hacimsel oranının artışıyla ısı iletkenlik ve viskozite değerleri artmıştır.

- Isı transfer akışkanı olarak nanoakışkanın kullanıldığı deneylerin tümünde su kullanılan sisteme göre kolektör çıkış sıcaklıkları ve kullanım suyu sıcaklıklarının daha fazla olduğu görülmüştür.

- Isıl verim hesaplamaları için literatürde de sıklıkla yararlanılan ASHRAE 93-2003 standartı takip edilmiştir. Gün içerisinde sıcaklık, ışıyım gibi veriler okunurken bu standart koşullarını karşılayan veriler alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

- Absorbe edilen enerji parametresi  $F_R(\tau\alpha)$  yüksek iken kolektörden ayrılan enerji ( $F_R U_L$ ) parametresi düşük ise verimin arttığı görülmüştür.

- Çok yüksek hızlarda, akışkanın sıcaklık artışı çok küçük olduğundan kolektör veriminin debiden bağımsız olduğu tespit edilmiştir.

- Gün içerisinde yapılan ölçümler sonucunda hesaplanan maksimum verim değerlerindeki artışın yüzdelik oranlarının;  $Al_2O_3$ -su için % 0.2, % 0.4 ve % 0.8' lik konsantrasyonlarda suya göre sırasıyla % 71, % 63 ve % 61.1 ;  $CuO$ -su için sırasıyla % 87.8, % 84.61 ve % 73.1 ; son olarak  $TiO_2$ -su için sırasıyla % 52.5, % 47.6 ve % 35.7 olduğu belirlenmiştir.

- Grafikler incelendiğinde; farklı hacimsel oranlarda yapılan deneylerde, su ile kıyaslandığında; 50 lt/h debi için ortalama olarak  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı su ile kıyaslandığında % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlarında sırasıyla verimde % 71, % 61.17 ve % 52.8 artış elde edilmiştir. 150 lt/h debi için sırasıyla % 63, % 53.6 ve % 42.4 artış sağlanmıştır. Aynı şekilde 250 lt/h debi için suya göre sırasıyla % 61.1 , % 48.9 ve % 39.6 artış görülmüştür. 50 lt/h debi için ortalama olarak  $CuO$ -su nanoakışkanı su ile kıyaslandığında % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlarında sırasıyla verimde % 87.8, % 75.6 ve % 60.2 artış elde edilmiştir. 150 lt/h debi için sırasıyla % 84.61, % 68.9 ve % 59.6 artış sağlanmıştır. Aynı şekilde 250 lt/h debi için suya göre sırasıyla % 73.1, % 60.3 ve % 57.5

artış görülmüştür. 50 lt/h debi için ortalama olarak  $\text{TiO}_2$ -su nanoakışkanı su ile kıyaslandığında % 0.2, % 0.4 ve % 0.8 hacimsel oranlarında sırasıyla verimde % 52.5, % 48.3 ve % 41.2 artış elde edilmiştir. 150 lt/h debi için sırasıyla % 47.6, % 38.5 ve % 30.2 artış sağlanmıştır. Aynı şekilde 250 lt/h debi için suya göre sırasıyla % 35.7, % 31.2 ve % 29.8 artış görülmüştür.

- Bu durumda suyla kıyaslandığında verimdeki maksimum artışın % 0.2 hacimsel oranındaki CuO-su nanoakışkanında 50 lt/h debide olduğu tespit edilmiştir.

## 5. ÖNERİLER

- Aynı çalışma şartlarında farklı partiküllerle sentezlenecek nanoakışkanlarla uygun partikül tipi ve partikül çapı araştırılabilir.
- Nanoakışkanın kararlılığı partiküllerin akışkan içinde stabil olarak asılı kalmaları ile mümkün olduğundan uzun süre kararlı kalacak süspansiyon şartları araştırılmalıdır.
- Elektron mikroskop (TEM) görüntüleri alınarak zamana bağlı çökmesi gözlemlenebilir. Bu çalışmada TEM görüntülerini alma olanağı sağlanamamıştır. Hazırlanan karışımlar bekletilmeden sisteme eklendiğinden çökelmenin oluşturabileceği problemlerin önüne bu şekilde geçilmiştir.
- Kurulan deney sistemi, özellikle düzlemsel kollektörler, daha küçük hale getirilerek performansı araştırılabilir. Optimum boyut değerlerinin bulunması için çalışmalar yapılarak sistemin daha verimli çalışma koşulları incelenebilir.
- Düzlemsel kollektör üzerinde düşen güneş ışıınımdan maksimum yararlanmak için yutuculuğu yüksek seçici yüzey ile ilgili çalışmalar yapılarak sistemin verimini arttırmak mümkün olabilecektir.
- Sistemde kullanılan sirkülasyon pompası yerine çark içermeyen darbesiz akış sağlayacak peristaltik pompalar kullanılabilir. Bu sistemde test bölgesi çaplarında bulunabilecek peristaltik pompa maliyetleri fazla olduğu için bu tip bir pompa kullanmak mümkün olmamıştır.
- Nanoakışkanların sistemlerde kullanılması ile ilgili olarak; üretim maliyetlerinin fazla olması ve çok daha uzun süre kararlılığını koruyabilmesi için hazırlanması aşamasında ek önlemlere ihtiyaç duyulması gibi bazı problemler mevcuttur. Bu tür sıkıntılar giderildikten sonra birçok ısı değişim sistemlerinde kullanılmasının uygun olacağı söylenebilir.
- Enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerjilerin kullanılması ve yaygınlaştırılması sağlanarak özellikle güneş kuşağındaki ülkemizde güneş enerjisi teknolojisini kullanan enerji sistemlerinin verimlerini yükseltecek, yenilikçi ve çevreci Ar-Ge çalışmaları yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Maxwell J. C.**, A Treatise on Electricity and Magnetism, 1881. Second ed., Clarendon Press, Oxford, UK.
- [2] **Gürmen, S. Ebin, B.**, 2008. Nanopartiküller ve Üretim Yöntemleri-1, *Metalurji Dergisi*, **150**, 31-38.
- [3] **Choi, S.U.S.**, 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *The Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Francisco, USA, ASME, FED 231/MD 66, 99–105.
- [4] **Xuan Y., Li Q.**, 2000. Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **21(1)**, 58–64.
- [5] **Şahin, B.**, 2010. Nanokışkanların Isı Transferi ve Akış Karakteristiklerinin İncelenmesi, *TÜBİTAK Proje No: 105M292*, Erzurum.
- [6] **Dilek, E. F.**, 2008. Nanoakışkanların Hazırlanması ve Isıl İletkenliklerinin Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [7] **Zhu, H., Lin, Y., Yin, Y.**, 2004. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids, *Journal of Colloid and Interface Science*, **277**, 100–103.
- [8] **Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., Thompson, L. J.**, 2001. Anomalously Increased Effective Thermal Conductivity of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles, *Applied Physics Letters*, **78**, 718–720.
- [9] **Chang, H., Tsung, T. T., Chen, L. C., Yang, Y. C., Lin, H. M., Lin, C. K., Jwo, C. S.**, 2005. Nanoparticle Suspension Preparation Using the Arc Spray Nanoparticle Synthesis System Combined with Ultrasonic Vibration and Rotating Electrode, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **26**, 552–558.

- [10] **Lo, C.-H., Tsung, T.-T., Chen, L.-C., Su, C.-H., Lin, H.-M.,** 2005. Fabrication of Copper Oxide Nanofluid Using Submerged Arc Nanoparticle Synthesis System (SANSS), *Journal of Nanoparticle Research*, **7**, 313–320.
- [11] **Lo, C.-H., Tsung, T.-T., and Chen, L.-C.,** 2005. Shaped-Controlled Synthesis of Cu-Based Nanofluid Using Submerged Arc Nanoparticle Synthesis System (SANSS), *Journal of Crystal Growth*, **277**, 636–642.
- [12] **Wen, D., Ding, Y.,** 2004. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**, 5181–5188.
- [13] **Liu , M., Lin , M., Huang , I., Wang, C.,** 2005. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **32**, 1202–1210.
- [14] **Choi, S.U.S., Zhang, Z.G., Yu F.E.** 2001. Lockwood and E.A. Grulke, Anomalous Thermal Conductivity Enhancement Nanotube suspensions, *Applied Physics Letters*, **79**, 2252-2254.
- [15] **Xie H, Wang J, Xi T, Liu Y.,** 2001. Study on the thermal conductivity of SiC nanofluids. *J Chin Ceram Soc*, **29**(4), 361–364.
- [16] **Xie H.Q., Wang J.C., Xi T.G., Liu Y., Ai F., Wu Q.R.,** 2002. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles, *J Appl Phys*, **91**, 4568–4572.
- [17] **Patel , H. E., Sundararajan , T., Das S. K.,** 2010. An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids, *Journal of Nanoparticle Research*, **12**(3), 1015-1031.
- [18] **Kang H.U., Kim S.H., Oh J.M.,** 2006. Estimation of thermal conductivity of nanofluid using experimental effective particle volume. *Exp Heat Transfer*, **19**(3), 181–91.

- [19] **Yu, W., France, D.M., Choi, S.U.S. ve Routbort, J.L.**, 2007. Review and Assessment of Nanofluid Technology for Transportation and Other Applications, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, **ANL/ESD/07-9**.
- [20] **Colangelo, G., Favale, E., Risi, A., Laforgia D.**, 2012. Results of experimental investigations on the heat conductivity of nanofluids based on diathermic oil for high temperature applications, *Applied Energy*, **97**, 828–833.
- [21] **Zhu H., Zhang C., Liu S., Tang Y., Yin Y.**, 2006. Effects of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  aqueous nanofluids, *Appl Phys Lett*, **89**, 023123.
- [22] **Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C.**, 2008. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids, *Int J Therm Sci*, **47**, 560–568.
- [23] **Hwang Y., Lee J.K., Lee C.H., Jung Y.M., Cheonga S.I., Lee C.G., Ku B.C., Jang S.P.**, 2007. Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids, *Thermochimica Acta*, **455**, 70–74
- [24] **Zhang X., Gu H., Fujii M.**, 2006. Experimental study on the effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids, *Int J Thermophys*, **27(2)**, 569–580.
- [25] **Zhang X, Gu H, Fujii M.**, 2007. Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles, *Exp Therm Fluid Sci*, **31**, 593–599.
- [26] **Lee D., Kim J.-W., and Kim B. G.**, 2006. A New Parameter to Control Heat Transport in Nanofluids: Surface Charge State of the Particle in Suspension, *The Journal of Physical Chemistry B*, **110(9)**, 4323–4328.
- [27] **Xu J.F., Zhang J.R., Du Y.W.**, 1996, Ultrasonic velocity and attenuation in nano-structured Zn materials, *Mater Lett*; **29**, 131–4.
- [28] **Verma P., Chaturvedi P., Rawat J.S.B.S.**, 2007. Elimination of current non-uniformity in carbon nanotube field emitters, *J Mater Sci: Mater Electron*, **18**, 677–80.
- [29] **Einstein, A.**, 1906. Eine neue bestimmung der moleküldimensionen,; *Annals. Phys.* **324(2)**, 289–306.
- [30] **Mishra P. C., Mukherjee S., Nayak S. K., Panda A.**, 2014. A brief review on viscosity of nanofluids, *Int Nano Lett*, **4**, 109–120.

- [31] **Tavman, I., Turgut, A.,** 2010. An investigation on thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids, *Microfluidics Based Microsystems NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology*, 139-162.
- [32] **Nguyen, C.T., Desgranges F., Gilles R., Nicolas G., Thierry M., Boucher S.,** 2007. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids–hysteresis phenomenon, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **28(6)**, 1492–1506.
- [33] **Weerapun, D., Somchai, W.,** 2009. Measurement of temperaturedependent thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub> water nanofluids, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **33(4)**, 706–714.
- [34] **Mahbubul, I.M., Saidur, R., Amalina, M.A.,** 2012. Latest developments on the viscosity of nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf*, **55(4)**, 874–885.
- [35] **Goharshadi, E.K., Ahmadzadeh, H., Samiee S., Hadadian M.,** 2013. Nanofluids for heat transfer enhancement-a review, *Phys. Chem. Res*, **1(1)**, 1–33.
- [36] **Thomas, S., Sobhan, C.B.P.,** 2011. A review of experimental investigations on thermal phenomena in nanofluids, *Nanoscale Res. Lett.*, **6(1)**, 1–21.
- [37] **Jia-Fei, Z., Zhong-Yang, L., Ming-Jiang, N.I., Ke-Fa, C.,** 2009. Dependence of nanofluid viscosity on particle size and pH value, *Chin. Phys. Lett.*, **26(6)**, 066202.
- [38] **Wang, X., Xu, X., Choi, S.U.S.,** 1999. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *J. Thermophys Heat. Transf*, **13(4)**, 474–480.
- [39] **Pak, B.C., Cho, Y.I.,** 1998. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Exp. Heat Transf Int. J.*, **11(2)**, 151–170.
- [40] **Li, Q., Yimin, X., Jian, W.,** 2006. Measurement of the viscosity of dilute magnetic fluids, *Int. J. Thermophys.* **27(1)**, 103–113.
- [41] **Radiom, M., Yang, C., Chan, W.K.,** 2010. Characterization of surface tension and contact angle of nanofluids, *Proceedings of Fourth International Conference on Experimental Mechanics*, **7522**, 75221D.
- [42] **Zhu, D.S., Wu, S.Y., Wang, N.,** 2010. Surface tension and viscosity of aluminum oxide nanofluids, *AIP Conference Proceedings*, 460-464.
- [43] **Fotukian, S.M., Esfahany, M.N.,** 2010. Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube, *Int. Commun. Heat Mass Trans*, **37**, 214-219.

- [44] **Williams, W., Buongiorno, J., Hu, L.W.**, 2008. Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/ water nanoparticle colloids (nanofluids) in horizontal tubes, *J. Heat Trans*, **130**, 042412.
- [45] **Duangthongsuk, W., Wongwises, S.**, 2010. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime, *Int. J. Heat Mass Trans*, **53**, 334-344.
- [46] **Kakaç, S., Pramuanjaroenkij, A.**, 2009. Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **52**, 3187–3196.
- [47] **Sarkar, J.**, 2011. A critical review on convective heat transfer correlations of nanofluids, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **11**, 3271–3277.
- [48] **Javadi, F.S., Saidur, R., Kamalisarvestani, M.**, 2013. Investigating performance improvement of solar collectors by using nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **28**, 232–245.
- [49] **Manay, E.**, 2014. Mikrokanallarda nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerinin araştırılması, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [50] **Kılınç, F.**, 2015. Oto radyatörlerde nanoakışkan kullanılarak ısı aktarım performansının artırılması, *Doktora Tezi*, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- [51] **Bedir, Ö.**, 2013. Sabit Isı Akıllı Yatay Bir Boruda Zorlanmış Türbülanslı Akışta Nanoakışkanların Sayısal İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [52] **Wu, J.M., Zhao J.**, 2013. A review of nanofluid heat transfer and critical heat flux enhancement-Research gap to engineering application, *Progress in Nuclear Energy*, **66**, 13-24.
- [53] **Escher, W., Brunschweiler, T., Shalkevich, N., Shalkevich, A., Burgi, T., Michel, B., Poulidakos D.**, 2011. On the cooling of electronics with nanofluids, *ASME J. Heat Transfer* **133**, 051401.
- [54] **Abouali, O., Ahmadi, G.**, 2012. Computer simulations of natural convection of single phase nanofluids in simple enclosures: a critical review, *Appl. Therm. Eng*, **36**, 1–13.
- [55] **Kamyar, A., Saidur, R., Hasanuzzaman, M.**, 2012. Application of computational fluid dynamics (CFD) for nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **55**, 4104–4115.

- [56] **Saidur, R., Leong, K.Y., Mohammad, H.A.,** 2011. A review on applications and challenges of nanofluids, *Renew. Sustain. Energy Rev.* **15**, 1646–1668.
- [57] **Karabulut, K.,** 2015. Isı değiştiricilerde ısı aktarımının nanoakışkanlar kullanılarak artırılması, *Doktora Tezi*, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- [58] **Geliş, K.,** 2013. şerit eleman kullanılan bir ısı değiştiricide nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümünün incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [59] **Sucu, A.,** 2011. Farklı eğriliklere sahip borulardaki nanoakışkan akımında ısı transferi ve basınç kayıp karakteristiklerinin sayısal incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.
- [60] **Çiloğlu, D.,** 2011. Nanoakışkanlarda havuz kaynama ısı transferinin deneysel incelenmesi, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [61] **Ho C.D., Chen T.C.,** 2006. The recycle effect on the collector efficiency improvement of double-pass sheet-and-tube solar water heaters with external recycle. *Renew Energy*, **31(7)**, 953–970.
- [62] **Hussain, A.M.,** 2006. The performance of a cylindrical solar water heater. *Renew Energy* **31(11)**, 1751–1763.
- [63] **Xiaowu, W., Hua B.,** 2005. Energy analysis of domestic-scale solar water heaters. *Renew Sustain Energy Rev*, **9(6)**, 638–645.
- [64] **Xuesheng, W., Ruzhu, W., Jingyi, W.,** 2005. Experimental investigation of a new-style double-tube heat exchanger for heating crude oil using solar hot water. *Appl Therm Eng* , **25**, 1753–1763.
- [65] [www.eie.gov.tr/yenilenebilir/g\\_enj\\_tekno.aspx](http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yenilebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi ve Teknolojileri. 25 Kasım 2015.
- [66] [www.aee-intec.at/0uploads/dateien1016.pdf](http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien1016.pdf). IEASHC Programme, Solar Heat Worldwide, 2014 edition. 25 Kasım 2015.
- [67] **Benli, H.,** 2016. Potential application of solar water heaters for hot water production in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **54**, 99–109.
- [68] **Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S.A., Pop, I., Wongwises, S.,** 2013. A review of the applications of nanofluids in solar energy, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **57**, 582–594.

- [69] **Elmir, M. Mehdaoui, R. Mojtabi, A.,** 2012. Numerical simulation of cooling a solar cell by forced convection in the presence of a nanofluid, *Energy Procedia*, **18**, 594–603.
- [70] **Gnanadason, M.K., Kumar, P.S., Rajakumar, S., Yousuf, M.H.S.,** 2011. Effect of nanofluids in a vacuum single basin solar still, *I.J.Aers*, **1**, 171–177.
- [71] **Tyagi, H. Phelan, P. Prasher, R.,** 2009. Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid – based direct absorption solar collector, *J. Solar Energy Eng.*, **131**, 041004.
- [72] **Otanicar, T.P., Phelan, P.E., Prasher, R.S., Rosengarten, G., Taylor, R.A.,** 2010. Nanofluid based direct absorption solar collector, *J. Renew. Sustain. Energy*, **2**, 033102.
- [73] **Taylor, R.A., Phelan, P.E., Otanicar, T.P., Walker, C.A., Nguyen, M., Trimble, S., Prasher R.,** 2011. Applicability of nanofluids in high flux solar collectors, *J. Renew. Sustain. Energy*, **3**, 023104.
- [74] **He, Y., Wang, S., Ma, J., Tian, F., Ren, Y.,** 2011. Experimental study on the light-heat conversion characteristics of nanofluids, *Nanosci. Nanotechnol. Lett.*, **3**, 494–496.
- [75] **Li, Y., Xie, H., Yu, W., Li, J.,** 2011. Investigation on heat transfer performances of nanofluids in solar collector, *Mater. Sci. Forum*, **694**, 33–36.
- [76] **Taylor, R.A., Phelan, P.E., Otanicar, T.P., Adrian, R., Prasher, R.P.,** 2011. Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors, *Nanoscale Res. Lett.* **6**, 225.
- [77] **Khullar, V., Tyagi, H., Phelan, P.E., Otanicar, T.P., Singh, H., Taylor, R.A.,** 2012. Solar energy harvesting using nanofluids-based concentrating solar collector, *Proceedings of MNHMT2012 3rd Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference on Atlanta, Georgia, USA*.
- [78] **Khullar, V. Tyagi, H.,** 2012. A study on environmental impact of nanofluid based concentrating solar water heating system, *Int. J. Environ. Studies*, **69**, 220–232.
- [79] **Otanicar, T.P., Golden, J.,** 2009. Comparative environmental and economic analysis of conventional and nanofluid solar hot water technologies, *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 6082–6087.
- [80] **Sardarabadi, M., Passandideh-Fard, M., Zeinali, S. Heris.,** 2014. Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units). *Energy*, **66**, 264–72.

- [81] **Risi A., Milanese, M., Laforgia, D.,** 2013. Modelling and optimization of transparent parabolic trough collector based on gas-phase nanofluids, *Renewable Energy*, **58**, 134–9.
- [82] **Bandarra Filho, E.P, Mendoza, O.S.H., Beicker, C.L.L., Menezes, A., Wen, D.,** 2014. Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system, *Energy Conversion Manage*, **84**, 261–7.
- [83] **Lu L., Liu Z.H., Xiao H.S.,** 2011. Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluids for high-temperature evacuated tubular solar collectors: Part 1: Indoor experiment. *Sol Energy*, **85**, 379–87.
- [84] **Kasaeian, A., Daviran, S., Azarian, R.D., Rashidi, A.,** 2015. Performance evaluation and nanofluid using capability study of a solar parabolic trough collector. *Energy Convers Manage*, **89**, 368–75.
- [85] **He, Y., Wang, S., Ma, J., Tian, F., Ren, Y.,** 2011. Experimental study on the light-heat conversion characteristics of nanofluids, *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, **3**, 494–6.
- [86] **Li, Y., Xie, H.Q., Yu, W., Li, J.,** 2011. Investigation on heat transfer performances of nanofluids in solar collector, *Materials Science Forum*, **694**, 33–4.
- [87] **Yousefi, T., Veisy, F., Shojaeizadeh, E., Zinadini, S.,** 2012. An experimental investigation on the effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. *Renew. Energ.*, **39**, 293–298.
- [88] **Yousefi, T., Veisy, F., Shojaeizadeh, E., Zinadini, S.,** 2012. An experimental investigation on the effect of MWCNT- $\text{H}_2\text{O}$  nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **39**, 207–212.
- [89] **Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh, E., Zinadini, S.,** 2012. An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT- $\text{H}_2\text{O}$  nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector, *Solar Energy*, **86**, 771–779.
- [90] **Tiwari, A.K., Ghosh, P., Sarkar, J.,** 2013. Solar water heating using nanofluids: a comprehensive overview and environmental impact analysis. *Int J Emerging Technol Adv Eng*, **3**, 221 – 4.
- [91] **Faizal, M., Saidur, R., Mekhilef, S., Alim, M.A.,** 2013. Energy, economic and environmental analysis of metal oxides nanofluid for flat-plate solar collector. *Energy Convers Manage*, **76**, 162–8.

- [92] **Moghadam, A.J., Farzane-Gord, M., Sajadi, M., Hoseyn-Zadeh, M.,** 2014. Effects of CuO/water nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector. *Exp Thermal Fluid Sci*, **58**, 9–14.
- [93] **Michael, J.J., Iniyar, S.,** 2015. Performance of copper oxide/water nanofluid in a flat plate solar water heater under natural and forced circulations, *Energy Convers Manage*, **95**, 160–9.
- [94] **He, Q., Zeng, S., Wang, S.,** 2015. Experimental investigation on the efficiency of flat plate solar collectors with nanofluids. *Appl Thermal Eng*, **88**, 165–171.
- [95] **EI-Said, E.M., Kabeel, A.E.,** 2013. Applicability of flashing desalination technique for small scale needs using a novel integrated system coupled with nanofluidbased solar collector. *Desalination*, **333**, 10–22.
- [96] **Chougule, S.S, Pise, A.T., Madane, P.A.,** 2012. Performance of nanofluid-charged solar water heater by solar tracking system, *Proceedings of IEEE International conference on advances in engineering, science and management(ICAESM)*, 247–53.
- [97] **Sarkar, J.,** 2013. Performance of a flat-plate solar thermal collector using supercritical carbon dioxide as heat transfer fluid. *Int J Sustain Energ*, **32**, 531–43.
- [98] **Said, Z., Saidur, R., Rahim, N.A., Alim, M.A.,** 2014. Analyses of exergy efficiency and pumping power for a conventional flat plate solar collector using SWCNTs based nanofluid. *Energy Build*, **78**, 1–9.
- [99] **Colangelo, G., Favale, E., Laforgia A., D.,** 2013. A new solution for reduced sedimentation flat panel solar thermal collector using nanofluids, *Applied Energy*, **111**, 80–93.
- [100] **Miller, J. C., Serrato, R., Represas- Cardenas, J. M. and Kundahl, G.,** 2004. *The Handbook of Nanotechnology*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [101] **Şahin, B.,Çomaklı, Ö., Yılmaz, M., Karşlı, S., Çomaklı, K., Özyurt, Ö., Karagöz, Ş., Kaya, M.,** 2010. Nanokışkanların Isı Transferi ve Akış Karakteristiklerinin İncelenmesi, *TÜBİTAK Proje No: 105M292*, Erzurum.
- [102] **Goldenstein, L., Radford, D., and Fitzhorn, P.,** 2002. The effect of nanoparticle additions on the heat capacity of common coolants, Argonne National Laboratory Transportation Technology R&D Centre, *SAE paper*, 01-3319.
- [103] **Mukherjee, S., Paria, S.,** 2013. Preparation and Stability of Nanofluids-A Review, *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, **9, 2**, 63-69.

- [104] **Akyürek, E.F.**, 2014. Nanoakışkanların ve Türbülatorlerin İç İç Borulu Isı Değiştirici Isıl Performansına Etkilerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [105] **Putra, N., Roetzel, W., Das, S.K.**, 2003. Natural convection of nano-fluids, *Heat and Mass Transfer*, **39**, 775-784.
- [106] **Artuç, M.**, 2007. Nanoakışkanların ısıl iletkenliklerinin ölçülmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [107] **Choi, S.U.S., Zhang, Z. G, Yu, W., Lockwood, F. E., Grulke, E.A.**, 2001. Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions, *Applied Physics Letters*, **79 (14)**, 2252- 2254.
- [108] **Xuan, Y., Roetzel, W.**, 2000. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *Int J Heat Mass Transfer*, **43(19)**, 3701–3707.
- [109] **Vajjha, R.S., Das, D.K.**, 2009. Specific heat measurement of three nanofluids and development of new correlations, *ASME, J Heat Transfer*, **131(7)**, 071601–071607.
- [110] **Vajjha R.S., Das, D.K.**, 2012. A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and pumping power. *Int J Heat Mass Transfer*, **55**, 4063–78.
- [111] **Zhou, L.,P, Wang, B.X., Peng, X.,F, Du, X-Z, Yang, Y.P.**, 2010. On the specific heat capacity of CuO nanofluid. *Adv Mech Eng*, **172085**, 1–4.
- [112] **Shin, D., Banerjee, D.**, 2014. Specific heat of nanofluids synthesized by dispersing alumina nanoparticles in alkalisalutectic. *Int J Heat Mass Transfer*, **74**, 210–4.
- [113] **Fakoor, Pakdaman M., Akhavan-Behabadi M.A., Razi, P.**, 2012. An experimental investigation on thermo-physical properties and over all performance of MWCNT/ heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes, *Exp Therm Fluid Sci* **40(0)**,103–11.
- [114] **Kumaresan, V., Velraj, R.**, 2012. Experimental investigation of the thermo-physical properties of water–ethyleneglycol mixture based CNT nanofluids. *Thermochim Acta*, **545(0)**, 180–6.
- [115] **Cheremisinoff, N. P.**, 1986. Slurry flow technology, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, **5**, Houston, TX: Gulf Publishing.
- [116] **Erkut, T. Z.**, 2012. Nanoakışkan Kullanarak Elektrikli Radyatörlerin Isıl Veriminin İyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.

- [117] **Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., DeWitt, D.P.**, 2011. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons. Inc., Seventh Edition.
- [118] **Das, S. K., Choi, S. U. S., Yu, W., Pradeep, T.**, 2008. Nanofluids Science and Technology, John Wiley & Sons. Inc.
- [119] [www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes](http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes), T.C. Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 23.12.2015
- [120] **Dağ, H.**, 2005. Güneş enerji sistemlerinde kullanılan dairesel borulu kollektör ile oval borulu kollektörlerin deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [121] **El, E.**, 2013. Sıcak Su Kollektörü İle Birleştirilmiş Damıtma Sistemi Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [122] **Taze, G.**, 2010. Düz güneş kollektörü verimini etkileyen bazı parametrelerin deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [123] **Duffie, J. Beckman, W.**, 2006. Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley.
- [124] **ASHRAE Standard 93-2003**. Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors, Atlanta, GA, USA.
- [125] **Yıldız, A.**, 2013. Gıda Kurutma Sistemlerinde Kullanılan Havalı Güneş Enerjisi Toplayıcıları, *11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*. İzmir, 65-76.
- [126] **Gupta, H.K., Agrawal, G.D., Mathur J.**, 2015. Investigations for effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  nanofluid flow rate on the efficiency of direct absorption solar collector. *Case Studies in Thermal Engineering*, **5**, 70-78.
- [127] **Chaji, H., Ajabshirchi, Y., Esmaeilzadeh, E., Heris, S.Z., Hedayatzadeh, M., Kahani M.**, 2013. Experimental study on thermal efficiency of flat plate solar collector using  $\text{TiO}_2$ /water nanofluid. *Modern Applied Science*, **7**,(10), 60-69.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Neşe BUDAK, 1985 yılında Diyarbakır'da doğdu. Orta ve lise eğitimini Diyarbakır Anadolu Lisesi' nde tamamladı. 2004 yılında başladığı Dicle Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2008 yılında birincilikle mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başlayıp 2011' de tamamladı. Aynı yıl aynı Anabilim dalında doktora eğitimine başladı. Şubat 2010' da Batman Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim dalında Araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen aynı görevine devam etmektedir.