



HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

Bir Araç Radyatöründe Al₂O₃ ve MgO Nano Akışkanları Kullanımının Isı Transferine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Experimental investigation of the effect of using Al₂O₃ and MgO nanofluids on heat transfer in a car radiator

Yazar(lar) (Author(s)): Refet KARADAĞ¹, Harun ÇİFCİ², İsmail HİLALİ³

¹ ORCID ID: 0000-0001-9120-2764

² ORCID ID: 0000-0001-7808-7917

³ ORCID ID: 0000-0001-7585-0016

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Karadağ R., Çifci H., Hilali İ., "Bir Araç Radyatöründe Al₂O₃ ve MgO Nano Akışkanları Kullanımının Isı Transferine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi", *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 8(1): 42-53, (2023).

DOI: 10.46578/humder.1197651



Bir Araç Radyatöründe Al₂O₃ ve MgO Nano Akışkanları Kullanımının Isı Transferine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Refet KARADAĞ¹, * Harun ÇİFCİ², İsmail HİLALİ³

¹Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Merkez/ADİYAMAN

^{2,3}Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Haliliye/ŞANLIURFA

Öz

Araç soğutma sistemlerinin en önemli elemanlarından olan radyatörlerde genel olarak su veya su-antifriz karışımları kullanılmakta olup bu akışkanlar özelliklerinden dolayı yeterli ısı transfer kapasitesine sahip değildir. Radyatörlerde ısı özellikleri daha iyi olan nano akışkanlar kullanılarak daha verimli bir soğutma yapılabilir. Bu çalışmada boru ve kanatçıklı yapıda olan bir araç radyatöründe farklı hacimsel konsantrasyonlarda (% 0.1, % 0.3, % 0.5) hazırlanan saf su esaslı Al₂O₃ ve MgO nano akışkanlarının 45, 50, 55 ve 60 °C giriş sıcaklıkları ve 7, 8, 9, 10 lt/dk hacimsel debilerde ısı transferine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel veriler kullanılarak en yüksek ısı transfer artışı; Al₂O₃ nano akışkanları için % 20.11, MgO nano akışkanı için ise % 27.11 olarak hesaplanmıştır. Hacimsel konsantrasyon ve debi artışı ile ısı transferi artış göstermiştir. Isı transferi açısından sıcaklığın; MgO nano akışkanları için olumlu, Al₂O₃ nano akışkanları için ise olumsuz etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 01/11/2022
Yayın: 28/04/2023

Anahtar Kelimeler

Nano akışkanlar
Araç radyatörü
Isı transferi

Keywords

Nanofluids
Car radiator
Heat Transfer

Experimental investigation of the effect of using Al₂O₃ and MgO nanofluids on heat transfer in a car radiator

Abstract

Water or water-antifreeze mixtures are generally used in radiators, which are one of the most important elements of vehicle cooling systems, and these fluids do not have sufficient heat transfer capacity due to their properties. More efficient cooling can be achieved by using nanofluids with better thermal properties in radiators. In this study, pure water-based Al₂O₃ and MgO nanofluids prepared in different volumetric concentrations (0.1%, 0.3%, 0.5%) in a car radiator with tube and fin structure at 45, 50, 55 and 60 °C inlet temperatures and 7, 8, 9, 10 The effect on heat transfer at volumetric flow rates of lt/min was investigated experimentally. The highest heat transfer increase using experimental data; It was calculated as 20.11% for Al₂O₃ nanofluids and 27.11% for MgO nanofluids. The heat transfer increased with the increase in volumetric concentration and flow rate. In terms of heat transfer, the temperature, It has been observed that it has a positive effect for MgO nanofluids and a negative effect for Al₂O₃ nanofluids.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz dünyasında teknolojik ilerlemelerle beraber yaşam kalitesindeki iyileşmelerin ve artan nüfusun da etkisiyle enerji kullanımı her geçen gün daha da artmaktadır. Enerji tüketimindeki artışlar ile birlikte ulaşım sektörlerinde kullanılan petrol yakıt rezervlerinin azalması ve fiyatlarının artışı da önemli bir durum haline gelmektedir. Enerji tüketimindeki artış, ısı transferi, ısı depolama ve birçok mühendislik uygulamalarında verimliliği artırmak ve enerji tasarrufu sağlamak için yüksek ısı performansına sahip gelişmiş ısı transfer sistemlerinin gelişmesi zorunlu olmaktadır.

Otomotiv endüstrisi gelişim açısından sürekli kendini yenilerken performans ve verimleri daha yüksek motorlar üretilmektedir. Otomotiv sektöründe; yüksek performanslı, daha az egzoz emisyonuna sahip ve yakıt tüketimi düşük araçlara talep artmaktadır. Otomotiv sektöründe yakıt tasarrufu açısından pek çok

*İletişim yazarı, e-mail: haruncifci28@gmail.com

uygulama mevcuttur. Araçlarda yakıt tüketimini azaltmanın bir yolu da soğutma performansının artırılmasıdır. Araç radyatörlerinin tasarımı ve boyutunu optimize etmek araç ağırlığını azaltarak yakıt tasarrufu sağlayabilmektedir. Radyatörler ayrıca otomobil aerodinamik davranışı üzerinde güçlü bir etkisi olan ön uç modülünün tasarımında önemli bir role sahiptir.

Radyatörler bir çeşit ısı değiştirici olup motorun ön kısmında yer alan motor soğutma sisteminin önemli bir parçasıdır. Motorun soğutulması için kullanılan sıvı motordan aldığı ısıyı pompa vasıtasıyla radyatörlerdeki kanallarda dolaştırır ve ısıyı atmosfere atar. Motor soğutma sistemi içerisinde genellikle su veya su antifriz karışımı kullanılır.

Isı transferini arttırmak ve ısı değiştiricilerinin boyutunu en aza indirmek suretiyle enerji ve yakıt verimlerini arttırmak için pek çok çalışma yapılmıştır. Farklı kanat tipleri, pürüzlü veya delikli yüzeyler, vorteks jeneratörleri veya çeşitli boru ekleri dahil çeşitli teknikler kullanarak ısı transferini arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır [1]. Bu tekniklerin çoğu geometrik ve yüzey alanları kapsamında yöntemler olup katkıları bakımından neredeyse limitlere ulaşmıştır. Ancak yine de gelişen sistemlerle birlikte ısı transferinde olan ihtiyaç artmakta olduğundan ısı değiştiricilerinde ısı kapasitenin artırılması her zaman talep edilen bir durum olmaktadır.

Isı değiştiricilerinde ısı transferini artırmanın bir yolu da soğutucu akışkanın termal özelliklerini iyileştirmektir. Bilindiği üzere katı malzemelerin ısıl iletkenlikleri ısı transfer sıvıları olarak kullanılan su, motor yağı, etilen glikol gibi geleneksel akışkanlara oranla daha yüksektir. Bu durumda sıvılara katı parçacıklar katılarak ısıl özellikleri iyileştirilebilir. Araştırmacılar önceleri mili ve mikro boyutta partikülleri sıvılara ekleyerek ısıl iletkenliklerini arttırmaya yönelik çalışmalar yapmışlar ancak partiküllerin boyutlarının büyük olması nedeniyle sistemlerde aşınma, çökme, kanallarda tıkanma ve yüksek oranda basınç düşümü etkisi oluşturmaları nedeniyle uygulamalardaki kullanılabilirliği pek mümkün olmamıştır. Nano teknolojideki gelişmeler ile birlikte nano boyutta partikül üretimi mümkün hale gelmiştir. Nano akışkanlar ilk olarak 1995 yılında, Amerika'daki Argonne Ulusal Laboratuvarı'nda Choi [2] tarafından geliştirildi. Bu tür sıvılar, 100 nm'den önemli ölçüde daha küçük olan ve geleneksel sıvılardan daha yüksek bir kütleli katı ısı iletkenliğine sahip parçacıkları içeren sıvı süspansiyonlardır [3]. Nano akışkanlar, metalik veya metalik olmayan oksit nanoparçacıklarının geleneksel ısı transfer akışkanlarında süspansiyon edilmesiyile oluşturulur. Milimetre veya mikrometre boyutunda partiküller içeren geleneksel katı-sıvı süspansiyonları ile karşılaştırıldığında, ısı değiştiricilerdeki soğutucu olarak nano-sıvılar, küçük süspansiyon katı partiküllerin boyutu nedeniyle daha iyi ısı transfer performansı gösterir. Partikül boyutları nano seviyesinde olduğu için sistemlerde tıkanma, aşınma, çökme ve yüksek oranda basınç düşümü etkisi göstermez. Mükemmel özelliklerinden ötürü nano-akışkanlar, aşırı stabilite, ultra yüksek ısıl iletkenlik gibi ısı transfer özelliklerini geliştirmede geniş bir uygulama alanı bulur. Isı transferi; yüzey alanı artışı, Brownian hareketi ve partikül arası kuvvetler nedeniyle artar, böylece artan termal iletkenlik, artan tek fazlı ısı transferi, artan kritik ısı akısı meydana gelir [4]. Nano akışkanlara bu özellikleri ile son yıllarda ilgi artmış olup nükleer sistemlerin soğutulması, elektronik sistemlerin soğutulması, iklimlendirme sistemleri gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır.

Günümüzde kullanılan ısı transfer sistemlerinde, ısıl performansı arttırmada birçok yöntem uygulanmaktadır. Bu uygulamalarda sistem boyutları ve pompalama gücü gibi etkenler verimlilik açısından kısıtlayıcı etkiye sahiptir. Geleneksel akışkanlar yerine nano akışkanlar kullanılarak ısı transferi iyileştirilebilir. Nano akışkanların önemli özellikleri arasında; ısı iletkenlikleri ve yüzey alanlarının yüksek olması, nano boyutlu olması ile çökme oranının az olması, mikro kanallarda tıkanmalara ve aşınmalara sebebiyet vermemesi gibi özellikler yer almaktadır. Nano akışkanların yüksek ısıl kabiliyetleri sayesinde ısı transfer sistemlerinin daha küçük boyutta tasarlanması sağlanabilmektedir. Bu sayede sistemlerdeki yatırım maliyetleri azalacak ve enerji daha etkili bir şekilde kullanılacaktır.

Nano akışkanların ısıl özelliklerinin iyi olması sayesinde otomobil, kamyon, iş makinelerinde kullanılan soğutma sistemlerinin daha küçük boyutta ve daha az kompleks olması sağlanabilir. Sistemlerin daha küçük yapıda olması ile araç dizaynları aerodinamik açıdan daha iyi yapılabilecektir. Argon Ulusal Laboratuvarında yapılan araştırma ile araç radyatörlerinde nano akışkan kullanımı ile radyatör alanı % 10 azaltılmış ve bunun sonucunda yakıtta % 5 tasarruf sağlanmıştır [5].

Nano akışkanlar üstün özellikleri ile pek çok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Literatürde nano akışkanların ısı değiştiricilerde kullanımı konusunda yapılan çalışmalarda;

Tiwari vd. [6] plakalı bir ısı değiştiricisinde farklı nano-partiküller (CeO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2) ve su ile hazırlanan nano akışkanları geniş bir konsantrasyon aralığında kullanarak (hacimce % 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0 ve % 3) ısı transfer performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar dūřuk hacimli konsantrasyonlarda TiO_2 ve CeO_2 nano partiküllerinin daha iyi ısı transfer davranışına sahip olduğunu ancak daha yūksel hacimsel konsantrasyonlarda ise Al_2O_3 ve SiO_2 nano partiküllerinin daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Yazarlar CeO_2 -su, Al_2O_3 -su, TiO_2 -su ve SiO_2 -su nano akışkanlarının kullanımı ile optimum hacim konsantrasyonunda maksimum ısı transfer katsayısındaki artışı sırasıyla; % 35.9, % 26.3, % 24.1 ve % 13.9 olarak raporlarında belirtmişlerdir. Vermahmoudi vd. [7] tarafından yapılan çalışmada hava soğutmalı kompakt bir ısı değiştiricideki nano akışkanların ısı performansını deneysel olarak incelenmiştir. Fe_2O_3 -su ile % 0.15, 0.4 ve % 0.65 hacimsel konsantrasyonlarında hazırlanan nano akışkanlara daha homojen dağılım sağlamak için % 0.8 polietilen glikol eklenmiş ve pH 11.1'e ayarlanmıştır. Sonuçlarda ısı transferinin ve ısı transfer katsayısının akış debisi ve nano partikül konsantrasyonu ile arttığı belirlenmiştir. Araştırmacılar ayrıca sıcaklık arttıka ısı transferinin artmasına karşın ısı transfer katsayısının azaldığını gözlemlemiştir. En yūksel hacimsel konsantrasyonda maksimum ısı transfer artışı % 11.5 ve maksimum ısı transfer katsayısı artışı % 13 olarak rapor edilmiştir. Abed vd. [8] Al_2O_3 , CuO , SiO_2 ve ZnO nano akışkanlarının (hacimce % 0-4) trapez kanallarda ısı transfer davranışını nümerik olarak incelemişlerdir. Yazarlar partikül konsantrasyonu artışı ile ısı transferinin arttığını ve basınç dūřūřünde de hafif bir artışın olduğunu belirtmiştir. En yūksel Nusselt sayısı artışı SiO_2 nano akışkanında meydana gelmiş olup % 4 hacimsel konsantrasyon için bu artış maksimum % 10 olarak rapor edilmiştir. Azmi vd. [9] dairesel bir tüpte % 0.5- % 1.5 hacimsel konsantrasyonlu TiO_2 -su nano akışkanlarının ısı transfer performansı üzerinde deneysel çalışma yapmışlardır. Nano akışkanlarının ısıl iletkenliğinde, konsantrasyondaki ve sıcaklıktaki artış ile iyileşmeler tespit edilmiştir. Dūřuk konsantrasyonlar için termal iletkenlikteki artış sıcaklıkla doğrusal olduğu belirtilmiştir. Konsantrasyon artışı ile viskozitede artışa neden olduğu ve sıcaklığın artmasıyla viskozitenin azaldığı belirtilmiştir. Araştırmacılar ısıl iletkenlik, viskozite ve nano akışkan ısı transfer katsayısının, çalışma sıcaklığı ve konsantrasyondan gūlü bir şekilde etkilendiğini ifade etmiştir. Maksimum ısıl iletkenlik artışı % 15.4, Nusselt sayısı artışı % 28.9 olarak hesaplanmıştır. Barzegarian vd. [10] Al_2O_3 nano partikülleri ve saf su ile elde edilen % 0.03, 0.14 ve 0.3 hacimsel konsantrasyonlu nano akışkanların ısı transfer karakteristiklerini bir kabuk borulu ısı değiştiricisi üzerinde deneysel olarak incelemişlerdir. Su yerine nano akışkan kullanılmasıyla Nu sayısının % 0.03, % 0.14 ve % 0.3 hacimsel konsantrasyonlar için sırasıyla % 9.7, % 20.9 ve % 29.8'e kadar arttığı bildirilmiştir. Aynı şekilde, hacimsel konsantrasyonlara göre, ısı değiştiricinin toplam ısı transfer katsayısının sırasıyla % 5.4, 10.3 ve 19.1 civarında arttığı belirtilmiştir. Basınç dūřūřü açısından, test bölümünde nano akışkan kullanarak az miktarda artış tespit edilmiştir. Yazarlar sıvı içerisine partikül eklenmesiyle suyun ısıl iletkenliğinin artmasında nano partiküllerin sınır tabaka kalınlığını azaltması ve Brownian hareketi gibi durumların etkili olduğunu raporlarında belirtmiştir. Bahmani vd. [11] Al_2O_3 -su nano akışkanlarının (hacimce % 0–10) paralel ve karşıt akışlı çift borulu ısı değiştiricilerinde ısı transferi, ısıl verim ve sıcaklık değişimlerini nümerik olarak incelemişlerdir. Yazarlar nanopartiküller hacim konsantrasyonu veya Reynolds sayısının arttırılmasının, Nusselt sayısının ve konveksiyon ısı transfer katsayısının artmasına neden olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, nanoparçacıkların hacimsel konsantrasyon artışıyla akışkanın çıkış sıcaklığı ve ısı değiştirici duvar sıcaklığının arttığı tespit edilmiştir. En yūksel ısıl verim ve Nu sayısı artışı karşıt akış koşullarında elde edilmiş ve maksimum ısıl verim ve ortalama Nusselt sayısı artışı, sırasıyla % 30 ve % 32.7 olarak belirtilmiştir. Araştırmacılar ısı değiştiricideki ısıl verim artışının maksimum % 5 hacimsel konsantrasyonunda gerçekleştiğini ve daha fazla nanopartikül eklemenin, ısıl verimin azalmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir. Mansoury vd. [12] aynı ısı transfer yūzey alanına sahip olan bir çift borulu, kabuk borulu ve plakalı ısı değiştiricilerin ısıl performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler hacimce % 0.2, % 0.5 ve % 1 konsantrasyonlu deiyonize su - Al_2O_3 nano akışkanları ile gerçekleştirilmiştir. Çift borulu ısı değiştiricisinde ısı transfer katsayısındaki maksimum artış % 60 olurken, plakalı ısı değiştiricisi için bu değer % 11 olarak rapor edilmiştir. Araştırmacılar nano akışkan kullanılması ile basınç dūřūřündeki en yūksel artışın plakalı ısı değiştiricisi için % 27, çift borulu ısı değiştiricisinde ise % 85 olduğunu bildirmiştir.

Nano akışkanların araç radyatöründe kullanımı ile ilgili literatürde yapılan alışmalar

Peyghambarzadeh vd. [13] tarafından yapılan çalışmada CuO ve Fe_2O_3 nano partikülleri ve saf su ile elde edilen % 0.15, % 0.4 ve % 0.65 hacimsel konsantrasyonlarındaki nano akışkanların otomobil radyatöründe ısı transfer performansı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada sıvı tarafı için Reynolds sayısı

50-1000 aralığında olup giriş sıcaklıkları 50, 65 ve 80 °C olarak uygulanmıştır. Ortam havası sabit sıcaklıkta olup hava akışı için Reynolds sayısı 500 ile 700 arasında değişmektedir. Araştırmacılar konsantrasyon artışı, hava hızı artışı ve nano akışkan debi artışı ile ısı transfer katsayısının arttığını ifade etmişlerdir. Deneysel sonuçlara göre nano akışkanlarda ısı transfer katsayısı saf suya göre % 9 daha yüksek olmuştur. Ancak nano akışkan giriş sıcaklığının artması ile ısı transfer katsayısının düştüğünü vurgulamışlardır. Naraki vd. [14] otomobil radyatörü içerisinde farklı hacimsel konsantrasyonlardaki (hacimce %0-0.4) CuO-su nano akışkanlarının ısı transfer katsayısını deneysel olarak laminer koşullar altında ($100 < Re < 1000$) incelemişlerdir. Deneylerde sıvı için, giriş sıcaklıkları 50-80°C olup hacimsel debi 0,2-0,5 m³/h'dir. Araştırmacılar nano akışkanların ısı transfer katsayısının suya oranla daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuçlara göre toplam ısı transfer katsayısının; sıvı giriş sıcaklığının artışı ile azaldığı, hacimsel debi artışı ile arttığı ve hava hızı artışı ile arttığı rapor edilmiştir. Toplam ısı transfer katsayısı artış oranının % 0.15 hacimsel konsantrasyon için % 6 olduğu, % 0.4 hacimsel konsantrasyon için % 8 olduğu ifade edilmiştir. Muhammad Ali vd. [15] farklı hacimsel konsantrasyonlara sahip MgO-su nano akışkanlarının (hacimce % 0.06, % 0.09 ve % 0.12) bir araba radyatöründe ısı transfer performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Sıvı hacimsel debisi 8-16 lt/dk ve giriş sıcaklıkları 56 °C, 60 °C, 64 °C olup deneyler türbülans akış koşullarında gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar giriş sıcaklıklarında 8 °C'lik bir artışın, ısı transfer oranında sadece % 6 artış gösterdiğini belirtirken % 0.12'lik hacimsel konsantrasyonundaki MgO nano akışkanında maksimum ısı transferi artışını % 31 olarak rapor etmişlerdir. Ayrıca düşük akış hızları, aynı hacimsel konsantrasyon için daha yüksek akış hızlarına kıyasla daha yüksek ısı transfer hızlarını sağladığı belirtilmiştir. Nieh vd. [16] tarafından yapılan deneysel çalışmada alumina, titania nano partikülleri ile saf su ve etilen glikol (antifriz) ile elde edilen nano akışkanlar kullanılarak hava soğutmalı bir motosiklet radyatöründe ısı transfer performansı incelenmiştir. Yapılan deneylerde farklı nanopartikül konsantrasyonu (kütlece % 0.5, % 0.1, % 2), farklı hacimsel debiler (4.5, 6.5 ve 8.5 l/dk) ve farklı radyatör giriş sıcaklıklarının (80, 85, 90, ve 95°C) ısı transfer kapasitesi, basınç düşümü ve pompalama gücü değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmacılar deneyler sonrasında en yüksek ısı transfer miktarının titanium nano akışkanında meydana geldiğini belirtmiş olup yaptıkları çalışma sonucunda nano akışkanlar ile maksimum ısı transferinin % 25.6, basınç düşümünün % 6.1, pompa gücünün % 2.5 olarak arttığını ve radyatör etkinlik faktörünün % 27.2 arttığını ifade etmişlerdir. Adnan vd. [17] TiO₂ ve SiO₂ nanopartikülleri ile saf su esaslı nano akışkanlar hazırlanarak otomobil radyatöründe ısı transferine etkilerini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmada sıvı debisi 2-8 lt/dk, giriş sıcaklıkları 60–80 °C ve hacimsel konsantrasyon % 1–2 olarak uygulanmış olup, araştırmacılar hacimsel debi artışı, radyatör sıvı giriş sıcaklığı artışı ve hacimsel konsantrasyon artışı ile Nusselt sayısında artış meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Araştırmacılar SiO₂ nano-akışkanının, TiO₂ nano-akışkanından daha yüksek bir ısı transferi sağladığını, benzer şekilde, TiO₂ nano-akışkanı saf sudan daha fazla ısı transferi sağladığını tespit etmişlerdir. Maksimum Nusselt sayısı artışı TiO₂ için % 11, SiO₂ için % 22.5 olarak rapor edilmiştir. Arunkumar vd. [18] otomobil radyatöründe Al₂O₃-MgO ve TiO₂ nano partiküllerinin % 0.12 ve % 0.4 hacimsel konsantrasyonlarda temel akışkan olan su ve etilen glikol karışımına eklenmesiyle elde edilen nano akışkanların ısı transfer performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Türbülanslı akış koşullarında gerçekleşen deneysel çalışmada sıvı giriş sıcaklıkları 40-60°C olarak uygulanmış olup, % 0.4 hacimsel konsantrasyonlu Mg-Al₂O₃ nano akışkanında su ile kıyasla ısı transferinin % 33.18'e kadar arttığı tespit edilmiştir. Tijani vd. [19] tarafından yapılan nümerik çalışmada bir araba radyatöründe soğutucu olarak eşit oranlarda su ve etilen glikol karışımı ile Al₂O₃ ve CuO nanopartikülleri (hacimce % 0.05, % 0.15 ve % 0.3) kullanılarak elde edilen nano akışkanların ısı transfer performansına etkisi incelenmiştir. Çalışma sonuçlarında araba radyatöründe soğutucu sıvıya Al₂O₃ ve CuO nano partiküllerinin eklenmesi ile; ısı iletkenliği, ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısının arttığı tespit edilmiştir. CuO nano akışkanının Al₂O₃ nano akışkanına kıyasla daha yüksek bir ısı transfer performansı gösterdiği ve bu sonucu sağlayan hacimsel konsantrasyonun % 0.3 ve akış debisinin 6 l/dk olduğu rapor edilmiştir. Karimi vd. [20] tarafından yapılan çalışmada MgO-MWCNTs nano partiküllerinin etilen glikol ve su içerisinde dağıtılmasıyla elde edilen nano akışkanların ısı transfer performansı yatay ve dikey borulu radyatörlerde nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmada farklı akış hızı, giriş sıcaklıkları ve konsantrasyonun basınç düşümü ve Nusselt sayısına etkileri incelenmiştir. Sonuçlara göre partikül konsantrasyonunun artışı ile Nusselt sayısının ve basınç düşüşünün arttığı belirtilmiştir. Araştırmacılar radyatör giriş sıcaklığı artışı ile basınç düşüşünün azaldığını ve Reynolds sayısındaki artışın basınç düşüşünde artışa yol açtığını ifade etmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca dikey borulu radyatörlerin yatay borulu radyatörlere göre % 10'a kadar daha iyi verime sahip olduğunu belirtmiştir. Subhedar vd. [21] tarafından yapılan çalışmada Al₂O₃-su mono etilen glikol nano

akışkanlarının ısı transfer performansı otomobil radyatörlerinde laminer koşullar altında deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel hacimsel konsantrasyon % 0.2 - 0.8, sıvı hacimsel debi 4-9 lt/dk, giriş sıcaklığı 65-85 °C olarak uygulanmıştır. Araştırmacılar çalışma sonucunda radyatörün ısı transfer performansının nano akışkanlar kullanılarak arttığını tespit etmişlerdir. Yazarlar nano akışkan hacimsel konsantrasyon ve akış hızı artışının ısı transfer artışındaki en önemli etkenler olduğunu ifade ederken maksimum Nusselt sayısı artışının % 28.47 olduğunu bildirmiştir. Ravisankar vd. [22] tarafından yapılan çalışmada bir traktör radyatöründe saf su ve Cu nano partikülleri ile elde edilen nano akışkanların ısı transfer performansı türbülanslı koşullarda incelenmiştir. Hacimsel konsantrasyonların % 0.025, 0.05 , % 0.075 ve sıvı giriş sıcaklıklarının 50-60 °C olduğu deneysel çalışma sonuçlarına göre ısı transfer katsayısının nano partiküllerin hacimsel konsantrasyonu ve akışkan debisi artışı ile arttığı tespit edilmiştir. Isı transfer katsayısındaki maksimum artışın %31 olduğu rapor edilmiştir. Yazarlar ayrıca ısı transfer katsayısının nano akışkan giriş sıcaklığı ile azaldığını belirtmişlerdir. Chaurasia vd. [23] Al₂O₃-su nano akışkanlarının bir otomobil radyatöründe soğuma performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Nano akışkan hacimsel konsantrasyonları % 0.1, 0.15 ve 0.2 olup sıvı akışkan giriş sıcaklıkları 45-70° C, hacimsel debisi 40-100 lt/h ve hava hızı ise 1.8–2.5 m/s olarak uygulanmış olup sonuçlara göre akışkan akış hızındaki ve hava akış hızındaki bir artışın, ısı transfer performansını arttırdığı tespit edilmiştir. % 0.2 hacimsel konsantrasyonlu nano akışkan için saf suya kıyasla % 44.29 'a kadar bir ısı transfer hızı artışının meydana geldiği araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir. Contreras vd. [24] otomobil radyatöründe, eşit oranlarda su ve etilen glikol temel akışkanına grafen ve gümüş nano partikülleri (hacimce % 0.01, % 0.05 ve % 0.1) dağıtılarak elde edilen nano akışkanların termohidrolik performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Sıvı için akış debisi 0.08 - 0.11 kg /s, giriş sıcaklıkları 55 ile 85 °C arasında olup hava akış hızı 2,1 m/s olarak uygulanmıştır. Araştırmacılar deneysel sonuçlarda gümüş nano akışkanların, ısı transfer hızında % 4.4'e varan bir artış sağladığını ve grafen nano akışkanlarının temel sıvıyla karşılaştırıldığında termohidrolik performansında bir düşüş sergilediğini tespit etmişlerdir. Yazarlar maksimum pompalama gücü artışının % 4.1 olduğunu bildirmişlerdir. Neves vd. [25] tarafından yapılan nümerik çalışmada bir otomobil radyatöründe Al₂O₃-su ve TiO₂-su nano akışkanlarının ısı transfer performansları incelenmiştir. Araştırmacılar yaptıkları çalışma sonucunda her iki nano akışkanın da benzer ısı transfer performans gösterdiklerini tespit etmişlerdir. Her iki nano akışkan için de maksimum ısı transfer artışı % 32.7 olarak rapor edilmiştir. Yazarlar, nano akışkan konsantrasyonu arttıkça ısı transferinin arttığını, Re sayısının arttıkça ısı transferi artışının azaldığını belirtmişlerdir. Koca [26] tarafından yapılan çalışmada bir otomobil radyatöründe grafen su bazlı nano akışkanın soğutma performansı deneysel olarak incelenmiştir. Laminer akış koşullarında gerçekleştirilen çalışma sonucunda % 0.02 hacimsel konsantrasyonlu nano akışkan kullanımı ile ısı transfer hızında % 47 artış sağlandığı belirtilmiş olup toplam ısı transfer katsayısında % 52 ve Nusselt sayısında % 34 artış olduğu ifade edilmiştir. Nano partikül konsantrasyonunun % 0.02 hacimsel konsantrasyonunun üzerine çıkarıldığında soğutma performansının düşmeye başladığı ifade edilmiştir.

Bu çalışmada alüminyum boru ve kanatçıklı yapıdan oluşan bir araba radyatöründe farklı konsantrasyonda (hacimce % 0.1, % 0.3, % 0.5) hazırlanan saf su esaslı Al₂O₃ ve MgO nano akışkanlarının 45, 50, 55 ve 60 °C giriş sıcaklıkları ve 7, 8, 9, 10 lt/dk hacimsel debilerde ısı transferine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Nano akışkan deneylerine referans oluşturmak üzere öncelikle saf su ile deneyler yapılmıştır. Sonrasında nano akışkan deneyleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen veriler ile toplam ısı transferinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Nano Akışkanların Hazırlanması

Genel olarak Nano akışkanların hazırlanmasında tek adım ve iki-adım yöntemi olmak üzere iki temel yöntem kullanılmaktadır.

İki-adım metodu: İki adım metodu nano akışkan hazırlanmasında kullanılan en yaygın yöntemdir. Nano partiküller, nano fiberler, nano tüpler ve diğer nano materyaller öncelikli olarak kimyasal veya fiziksel yöntemlerle kuru toz olarak üretilir. Daha sonra nano boyuttaki bu tozlar su, temel akışkan içerisinde dağıtılır. Akışkan içerisinde partikülleri stabil hale getirmek ve homojen dağılım elde etmek için magnetik karıştırma, ultrasonik karıştırma, yüksek parçalayıcı karıştırma gibi işlemler uygulanır.

Tek-adım metodu: Tek adım metodunda nano partikül üretimi ve temel akışkan içerisinde dağıtımını aynı anda gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem ile daha homojen dağılımlı ve stabil nano akışkanlar elde edilebilmektedir. Partiküllerin topaklanma oranları da iki adım metoduna göre daha azdır. Ancak bu yöntem geniş uygulama alanına sahip değildir. Üretim maliyetleri yüksektir ve kullanılacak partikül çeşidi sınırlıdır.

Bu çalışmada nano akışkanlar iki adım yöntemiyle hazırlanmıştır. Partikül olarak Tablo 1’ de termofiziksel özellikleri verilen Al_2O_3 ve MgO nano partikülleri (Nano grafi firmasından satın alınmıştır.) ve sıvı olarak saf su kullanılmıştır. Hacimsel konsantrasyonlar % 0.1, % 0.3 ve % 0.5 olarak belirlenmiş olup bu konsantrasyonlar için gerekli partikül miktarları tespit edilip saf su içerisine eklenmiştir. Partiküller saf su ile buluşturulduktan sonra manyetik karıştırıcı ile 30 dk karıştırılmıştır. Manyetik karıştırma işleminin sonrasında süspansiyonlara 45 dk süresince Şekil 1’de gösterilen cihaz (Sonics Vibra Cell 750) ile ultrasonik karıştırma işlemi yapılmıştır. Her bir akışkan için sıvı hacmi 10 lt olarak hazırlanmıştır.

Şekil 2’de hazırlanan akışkanlar için alınan numuneler gösterilmektedir. Deneyler öncesi elde edilen süspansiyonların stabilite ve çökme durumları en yüksek hacimsel konsantrasyon olan % 0.5 için üç gün boyunca gözlemlenmiş olup herhangi bir çökme oluşmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 1. Ultrasonik karıştırma cihazı



Şekil 2. Hazırlanan % 0.5 hacimsel konsantrasyonlu MgO ve Al_2O_3 nano akışkanları

Tablo 1. Nano Partiküllere Ait Termofiziksel Özellikler

Partikül	Özgül Isı – Cp (J/kg.K)	Partikül Boyutu (nm)	Isı İletim Katsayısı k (W/m.K)	Yoğunluk d (gr/cm ³)	Safılık	Morfolojik yapı	Spesifik Yüze Alanı (SSA) m ² /gr	Renk
MgO	1030	18 nm	60	3,54	99.5+%	Polihedral	>65	Beyaz
Al ₂ O ₃	880	4 nm	35	3,9	99.995%	Küresel	>20	Beyaz

2.2. Nano Akışkanların Termofiziksel Özellikleri

DeneySEL çalışmada kullanılmak üzere Al₂O₃ ve MgO nano akışkanları % 0.1, % 0.3 ve % 0.5 hacimsel konsantrasyonlarında hazırlanmıştır. Hazırlanan nano akışkanların yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı ve viskozite değerleri için aşağıdaki Tablo 2’de belirtilen eşitlikler kullanılmış olup elde edilen değerler Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 2. Nano akışkanların termofiziksel özellikleri tespitinde kullanılan eşitlikler

Hesaplanan Özellik	Eşitlik	Referans
Yoğunluk	$\rho_{nf} = \phi * \rho_{np} + (1 - \phi)\rho_{bf}$	Pak and Cho [27]
Özgül Isı	$C_{p,nf} = \frac{\phi\rho_p C_{p,p} + (1 - \phi)\rho_{bf} C_{p,bf}}{\rho_{nf}}$	Xuan and Roetzel [28]
Isı İletim Katsayısı	$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_{bf} + \phi(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \phi(k_p - k_{bf})} k_{bf}$	Maxwell [29]
Viskozite	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\phi)$	Einstein [30]

Tablo 3. Farklı sıcaklıklar için deneylerde kullanılan nano akışkanlara ait termofiziksel özellikler

45 °C giriş sıcaklığı					
Akışkan	Hacimsel Kons. %	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kgK)	k (W/mK)	μ (kg/ms)
Saf su	-	990,100	4180,000	0,637	0,000599
MgO-su	0,1	992,650	4168,766	0,637	0,000599
MgO-su	0,3	997,750	4146,472	0,638	0,000600
MgO-su	0,5	1002,850	4124,403	0,639	0,000600
Al ₂ O ₃ -su	0,1	990,390	4178,054	0,637	0,000599
Al ₂ O ₃ -su	0,3	991,550	4171,723	0,638	0,000600
Al ₂ O ₃ -su	0,5	993,000	4164,191	0,639	0,000600
50 °C giriş sıcaklığı					
Saf su	-	988,100	4181,000	0,644	0,000547
MgO-su	0,1	990,652	4169,740	0,644	0,000547
MgO-su	0,3	995,756	4147,394	0,645	0,000548
MgO-su	0,5	1000,860	4125,275	0,646	0,000548
Al ₂ O ₃ -su	0,1	988,390	4179,056	0,644	0,000547
Al ₂ O ₃ -su	0,3	989,551	4172,723	0,645	0,000548
Al ₂ O ₃ -su	0,5	991,002	4165,185	0,646	0,000548
55 °C giriş sıcaklığı					
Saf su	-	985,200	4183,000	0,649	0,000504
MgO-su	0,1	987,755	4171,700	0,649	0,000504
MgO-su	0,3	992,864	4149,274	0,650	0,000505

MgO-su	0,5	997,974	4127,079	0,651	0,000505
Al ₂ O ₃ -su	0,1	983,591	4181,059	0,649	0,000504
Al ₂ O ₃ -su	0,3	984,753	4174,720	0,650	0,000505
Al ₂ O ₃ -su	0,5	986,207	4167,171	0,651	0,000505
60 °C giriş sıcaklığı					
Saf su	-	983,300	4185,000	0,654	0,000467
MgO-su	0,1	985,857	4173,671	0,654	0,000467
MgO-su	0,3	990,970	4151,189	0,655	0,000468
MgO-su	0,5	996,084	4128,937	0,656	0,000468
Al ₂ O ₃ -su	0,1	983,591	4183,060	0,654	0,000467
Al ₂ O ₃ -su	0,3	984,753	4176,716	0,655	0,000468
Al ₂ O ₃ -su	0,5	986,207	4169,157	0,656	0,000468

2.2. Deney Düzenegi

Şekil 3, bu çalışmada kullanılan deney düzenegini göstermektedir. Deney düzeneginin temel elemanları bir adet krom malzemeden imal edilmiş sıvı depo tankı (30 lt), ısıtıcı rezistans, bir adet santrifüj pompa, bir adet manyetik debimetre, bir adet fan, bir adet otomobil radyatörü ve borulardan oluşmaktadır. Sıvı giriş sıcaklıklarını ayarlamak için bir adet elektrikli dijital termostat kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri için T tipi termokupl ve Hioki marka datalogger kullanılmıştır. Birer adet Radyatör sıvı giriş ve çıkış noktasına, 9 adet radyatör yüzeyine ve birer adet hava kanalı giriş ve çıkışına konulmak üzere toplam 13 adet termokupl kullanılmıştır. Sıvı akış hacimsel debisini ayarlamak için bir adet frekans inverter kullanılmıştır.



Şekil 3. Deney düzenegi görseli

Şekil 4' te deney sisteminde kullanılan radyatör gösterilmektedir. Radyatör dairesel kesitli alüminyum borular ve kanatçıklardan oluşmaktadır. Radyatöre ait özellikler Tablo 4' te belirtilmektedir. Sıcaklık ölçümleri sıvı hattı için radyatör giriş ve çıkış noktalarından, hava hattı için fan giriş ve radyatör kanalı çıkışından ölçülmüştür. Sıvı tankı toplam hacmi 30 lt dir. Sıvı giriş sıcaklıklarını 45-60 °C aralıklarında ayarlamak için rezistanslar (7,5 KW) bir dijital termostata bağlanmıştır. Santrifüj pompa 75W gücünde, 1-20 lt/dk debisinde olup, çıkış tarafına 7-10 lt/dk arasında debi ayarı yapabilen bir adet frekans inverteri konulmuştur. Sıvı debisi bir adet manyetik debimetre ile ölçülmüştür. Kullanılan manyetik debimetrenin ölçüm aralığı 1-15 lt/dk ve maksimum çalışma sıcaklığı 200 °C dir.

Tüm deneyler atmosferik basınç altında gerçekleştirilmiş ve çalışma ortamının sıcaklığı 25 °C olması için laboratuvarında 24.000 BTU/h gücünde bir adet split klima kullanılmıştır.

Radyatör dış yüzeyinin soğutulmasında bir adet radyatör fanı kullanılmış olup hava hızının kontrolü hız anahtarı ile sağlanmıştır. Hava hızı pervaneli tip anemometre (Testo 445) ile fan çıkışında farklı konumlarda ölçülmüştür.

Tablo 4. Radyatöre ait özellikler

Radyatör Özellikleri
Kanatçık Malzemesi: Alüminyum
Tüp Malzemesi: Alüminyum
Tüp Geometrisi: Silindirik
Tüp Sayısı: 50 adet
Tüp Çapı: 10mm
Radyatör ölçüleri: yükseklik= 38 cm, Genişlik = 48 cm, Derinlik 3,7 cm
Kanatçık: 180 adet, 0,125mm

**Şekil 4. Deneylerde kullanılan radyatör**

2.4. Deneylerin Yapılışı

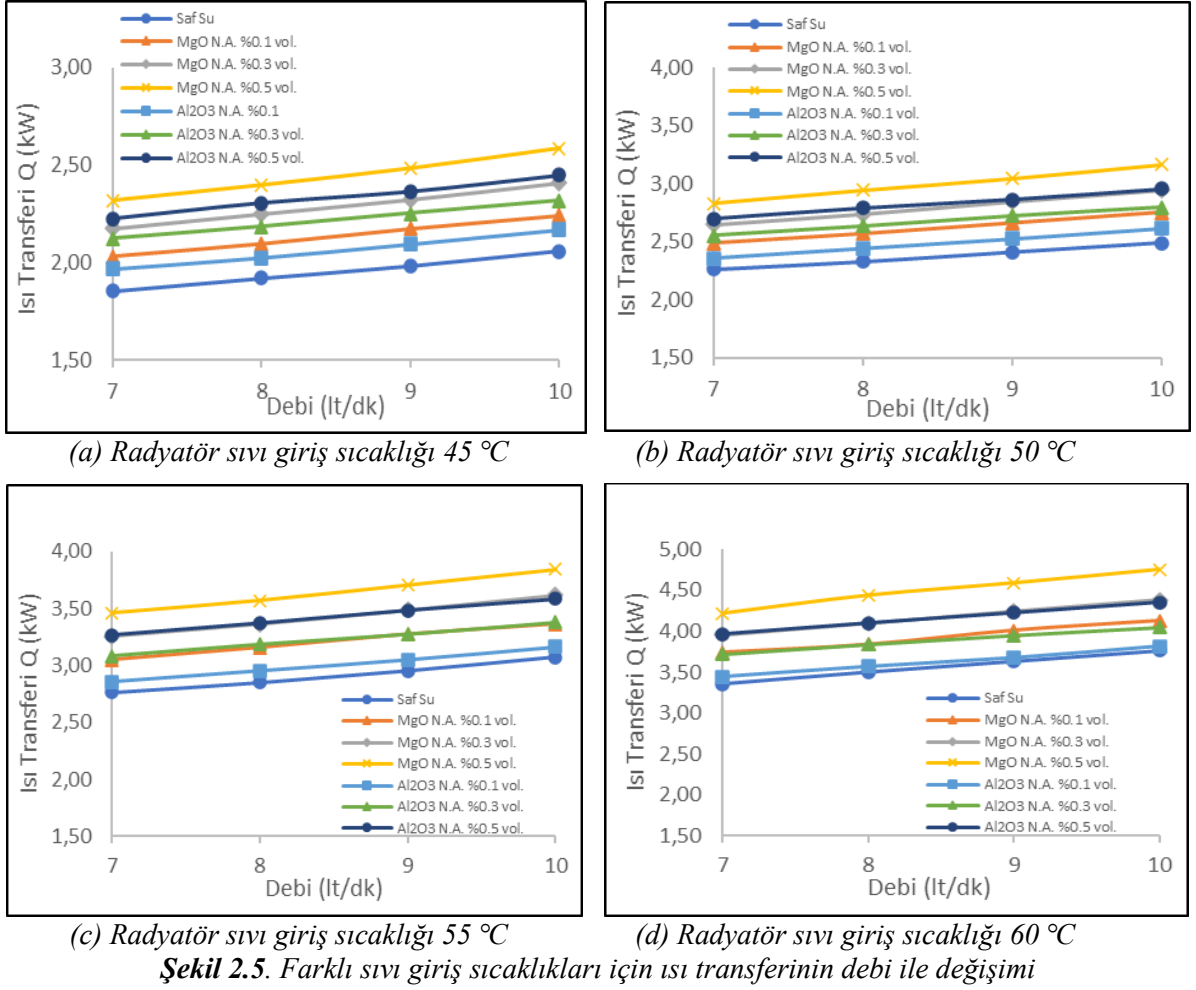
Deneylerde kullanılmak üzere % 0.1, % 0.3 ve % 0.5 hacimsel konsantrasyonlu nano akışkanlar için gerekli nano partikül miktarları hesaplanmış olup daha sonra hassas terazi ile tartılarak saf su içerisine eklenmiştir. Partiküllerin saf su içerisine eklenmesi sonrasında karışıma manyetik karıştırma işlemi uygulanmıştır. Manyetik karıştırma işleminden sonra süspansiyon ultrasonik karıştırma cihazı ile homojenize edilmiştir. Nano akışkanlar hazırlandıktan sonra krom malzemeden imal edilmiş sıvı tankına aktarılmıştır. Burada ısıtılan sıvı pompa vasıtasıyla radyatöre aktarılmıştır. Deneylerde radyatöre sıvı girişi için 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C olmak üzere 4 farklı sıcaklık; 7, 8, 9 ve 10 lt/dk olmak üzere 4 farklı debi değeri uygulanmıştır. Şartlandırılarak radyatöre aktarılan sıvı burada hava kanalından gelen oda sıcaklığındaki hava ile soğutularak ısısını dış ortama atmıştır. Radyatör giriş-çıkış sıcaklıkları, hava giriş ve çıkış sıcaklıkları, radyatör yüzey sıcaklıkları dataloggere bağlı olan T tipi termokupullar ile ölçülerek kayıt edilmiştir. Sıcaklık ölçümleri kayıt edildikten sonra veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Daha sonra ısı transfer hesaplamaları yapılmıştır.

2.5. Isı Transfer Hesabı

Deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler ile radyatörde meydana gelen ısı transferi eşitlik (1) ile bulunmuştur. Termal özellikler için sıvı giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalaması alınarak o değere karşılık gelen veriler alınmıştır.

$$\dot{Q} = [\dot{m}C_p(T_g - T_c)]_{sıvı} \quad (1)$$

Farklı sıvı giriş sıcaklıkları için ısı transferinin debi ile değişimi Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Al_2O_3 nano akışkanları için en yüksek ısı transfer artışı 45 °C ve 8 lt/dk debi için % 20.11 olarak hesaplanmıştır. En yüksek ısı transfer artışı % 27.11 ile 10 lt /dk debide 55 °C'deki MgO nano akışkanında meydana gelmiştir.

Genel olarak debi artışı ile ısı transfer artış oranı artarken sıcaklık artınca bu artış nano akışkan cinsine göre değişkenlik göstermiştir. MgO nano akışkanları için sıcaklık arttıkça ısı transfer artış oranı artarken bu değer Al_2O_3 nano akışkanları için azalma eğilimindedir.

3. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada bir araba radyatöründe saf su ve nano akışkanlar ile ısı transferi deneyleri yapılmış olup yapılan deneyler sonrasında saf su deney sonuçları referans değerler olarak kabul edilmiştir. MgO ve Al_2O_3 nano akışkanları ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar bu değerler ile kıyaslanmıştır. Tüm deneyler için ısı transfer hesaplamaları yapılmış olup aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Hacimsel konsantrasyon ve sıvı debi artışı ile tüm nano akışkanlarda ısı transferi artış göstermiştir.
- Sıcaklık artışı ile MgO nano akışkanlarında meydana gelen ısı transfer miktarı artarken Al_2O_3 nano akışkanları için azalmaktadır.
- En yüksek ısı transfer performansı % 0.5 hacimsel konsantrasyonlu MgO nano akışkanında elde edilmiş olup bu artış değeri % 27.11 olarak hesaplanmıştır.
- Kullanılan nano akışkanlarda deney öncesi ve deneyler sırasında herhangi bir çökme gözlemlenmemiş olup çözeltilerde stabilite sağlanmıştır.

- Araç soğutma sisteminde su bazlı MgO veya Al₂O₃ nano akışkanları kullanılması ile ısı performansları açısından oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak su bazlı MgO ve Al₂O₃ nano akışkanları otomobil soğutma sistemlerinde kullanılması ısı verimliliği artırdığı tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmayı gerçekleştirirken her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışma 2017/17022 nolu HÜBAK projesi kapsamında yapılmıştır. Harran Üniversitesi HÜBAK birimine teşekkür ederim.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu makalemiz ile ilgili herhangi bir kurum, kuruluş veya kişiyle mali çıkar çatışması yoktur ve yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. E. Bergles, Heat transfer enhancement the encouragement and accommodation of high heat fluxes, *Journal of Heat Transfer*, 119:1 (1997) 8-19.
- [2] S. U. S. Choi, J. A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo.*, San Francisco, CA, 1995.
- [3] D. Wen, Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2004) 5181-5188.
- [4] Z. Haddad, C. Abid, H. F. Oztop, A. Mataoui, A review on how the researchers prepare their nanofluids. *Int. J. of thermal sciences* 76 (2014) 168-189.
- [5] D. Singh, J. Toutbort, G. Chen, Heavy vehicle system optimization merit review and peer evaluation, *Annual Report*, Argonne National Laboratory, 2006.
- [6] A. K. Tiwari, P. Ghosh, J. Sarkar, Performance comparison of the plate heat exchanger using different nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 49 (2013) 141-151.
- [7] Y. Vermahmoudi, S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, M. Naraki, 2014. Experimental investigation on heat transfer performance of Fe₂O₃/water nanofluid in an air-finned heat exchanger, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 44 (2014) 32-41.
- [8] A. M. Abed, K. Sopian, H.A. Mohammed, M.A. Alghoul, M. H. Ruslan, S.F. Mat, A. N. Al-Shamani, Enhance heat transfer in the channel with V-shaped wavy lower plate using liquid nanofluids, *Case Studies in Thermal Engineering*, 5 (2015) 13-23.
- [9] W.H. Azmi, K. A. Hamid, R. Mamat, K.V. Sharma, M.S. Mohamad, Effects of working temperature on thermo-physical properties and forced convection heat transfer of TiO₂ nanofluids in water – Ethylene glycol mixture, *Applied Thermal Engineering*, 106 (2016) 1190-1199.
- [10] R. Barzegarian, A. Aloueyan, T. Yousefi, Thermal performance augmentation using water based Al₂O₃-gamma nanofluid in a horizontal shell and tube heat exchanger under forced circulation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 86 (2017) 52-59.
- [11] M. H. Bahmani, G. Sheikhzadeh, M. Zarringhalam, O. A. Abdullah, Investigation of turbulent heat transfer and nanofluid flow in a double pipe heat exchanger, *Advanced Powder Technology*, 29:2 (2018) 273-282.
- [12] D. Mansoury, I. D. Faramarz, A. Kiani, A. J. Chamkha, M. Sharifpur, Heat transfer and flow characteristics of Al₂O₃/water nanofluid in various heat exchangers: Experiments on counter flow, *Heat Transfer Engineering*, 41:3 (2019) 220-234.
- [13] S. M. Peyghambarzadeh, S.H. Hashemabadi, M. Naraki, Y. Vermahmoudi. “Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator”, *Applied Thermal Engineering*, 52 (2013) 8-16.
- [14] M. Naraki, S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, Y. Vermahmoudi, Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator, *International Journal of Thermal Sciences*, 66 (2013) 82-90.

- [15] H. Muhammad Ali, H. Ali, H. Liaquat, , H.T. Maqsood, M. A. Nadir, Experimental investigation of convective heat transfer augmentation for car radiator using ZnO water nanofluids, *Energy*, 84 (2015) 317-324.
- [16] H. M. Nieh, T.P. Teng, C. C. Yu, Enhanced heat dissipation of a radiator using oxide nano-coolant, *International Journal of Thermal Sciences*, 77 (2014) 252-261.
- [17] M. Adnan, R. A. Hussein, K. B. Kadirgama, K. V. Sharma, Heat transfer enhancement using nanofluids in an automotive cooling system, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 53 (2014) 195–202.
- [18] T. Arunkumar, M. Anish, J. Jayaprabakar & N. Beemkumar, Enhancing heat transfer rate in a car radiator by using Al₂O₃ nanofluid as a coolant, *International Journal of Ambient Energy*. 40:4 (2017) 367-373.
- [19] A. S. Tijani, A. S. Sudirman, Thermos-physical properties and heat transfer characteristics of water/anti-freezing and Al₂O₃/CuO based nanofluid as a coolant for car radiator, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 118 (2018) 48–57.
- [20] A. Karimi, M. Afrand, Numerical study on thermal performance of an air-cooled heat exchanger: Effects of hybrid nano fluid, pipe arrangement and cross section, *Energy Conversion and Management* 164 (2018) 615–628.
- [21] D. G. Subhedar, Bharat M. Ramani, A. Gupta, Experimental investigation of heat transfer potential of Al₂O₃/ Water-Mono Ethylene Glycol nanofluids as a car radiator coolant, *Case Studies in Thermal Engineering* 11 (2018) 26–34.
- [22] R. Ravisankar, V. S. K. Venkatachalapathy, N. Alagumurthi, Application of nanotechnology to improve the performance of tractor radiator using Cu-water nanofluid, *Journal of Thermal Engineering*, 4:4 (2018) 2188-2200.
- [23] P. Chaurasia, A. Kumar, A. Yadav, P. K. Rai, V. Kumar, L. Prasad, Heat transfer augmentation in automobile radiator using Al₂O₃–water based nanofluid, *SN Applied Sciences*, 257:1 (2019) 2523-3963.
- [24] E. M. C. Contreras, G. A. Oliveira, E. P. B. Filho, Experimental analysis of the thermohydraulic performance of graphene and silver nanofluids in automotive cooling systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132 (2019) 375–387
- [25] F. Neves, A. A. Soares, A. Rouboa, Forced convection heat transfer of nanofluids in turbulent flow in a flat tube of an automobile radiator, *Energy*, 8 (2022) 1185-1195.
- [26] T. Koca, Otomobil Radyatöründe Su Bazlı Grafen Nanoakışkan Kullanımının Isıl Verimliliğe Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 11:3 (2020) 1157-1166.
- [27] Pak BC, Cho YI. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Exp Heat Transfer*, 11 (1998) 151-70.
- [28] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf.* 43 (2000) 3701–3707
- [29] J. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetisms*, 3rd ed, Clarendon Press, Oxford 1891.
- [30] A. Einstein, Eine neue bestimmung der moleküldimensionen, *Annalender Physik*, 19, (1906) 289–306.