

Thermal Behaviors of Thermophysical Properties of Hybrid Nanofluids

İpek AYTAÇ 

University of Turkish Aeronautical Association, Department of Mechanical Engineering, 06790, Etimesgut/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 22/06/2020

Revision: 21/08/2020

Accepted: 24/09/2020

Highlights

- Hybrid nanofluids.
- Thermophysical property
- Different concentrations

Keywords

Nanofluid
 Nanoparticle
 Thermophysical
 Thermal performance
 Hybrid

In this study, the thermophysical properties of nanofluids obtained by adding certain ratios to the pure water such that CuO, ZnO, MgO particles and CuO + ZnO, MgO + CuO, MgO + ZnO hybrid particles were determined theoretically using the models in the literature. Thermal conductivity, specific heat, viscosity values of nanofluids with different concentrations such as 0.5%, 1%, 2% and 2.5% were calculated and the models were compared.

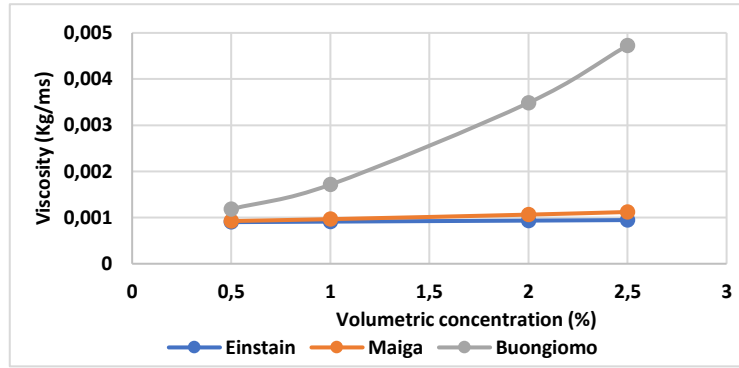


Figure A. Comparison of the viscosity values of nanofluids with literature models

Purpose: In this study, it is aimed to theoretically determine the thermophysical properties of nano fluids obtained by adding certain ratios of CuO, ZnO, MgO particles and CuO + ZnO, MgO + CuO, MgO + ZnO hybrid particles to pure water using models in the literature. Thermal conductivity, specific heat, viscosity values of nanofluids with different concentrations were calculated and made comments about the models by comparing the obtained results.

Theory and Methods: Hybrid nanofluids are an extension of mono nanofluids, obtained by suspension of hybrid nanoparticles in a basic liquid. Thermophysical properties of nanofluids and source research has been done. In order to determine the thermal behavior, models developed for thermophysical properties in the literature were examined.

Results: The results have shown that the heat holding and carrying capacity of metal oxides in nanofluids is higher than pure water. It has been observed that the thermal conductivity of the oxide and hybrid nanofluids is greater than the thermal conductivity of the base fluid at all mixing ratios. According to the results, when the volumetric concentration of nanofluids increases, specific heat values decrease in all models used.

Conclusion: In this study, thermophysical properties of nanofluids obtained by adding CuO, ZnO, MgO particles and CuO + ZnO, MgO + CuO, MgO + ZnO hybrid particles into pure water in certain proportions were theoretically determined using the models in the literature.

It has been observed that the efficiency of these systems will be much higher by using nanofluids, whose thermophysical properties are superior to pure water, in thermal systems such as heat pipes and heat exchangers.



Hibrit Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Isıl Davranışları

İpek AYTAÇ

University of Turkish Aeronautical Association, Department of Mechanical Engineering, 06790, Etimesgut/ANKARA

Öz

Nano boyutta metal oksit parçacıklar içeren nanoakışkanlar ve hibrit nanoakışkanların ısı sistemlerde çalışma akışkanı olarak kullanıldıklarında geleneksel akışkanlara göre ısı iletkenlik bakımından daha üstün performans sergiledikleri bilinmektedir. Çalışma akışkanlarının ısı ve fiziksel özellikleri birçok ısı ve akış problemlerinin çözümünde önemli parametreler olarak yer alır. Bu çalışmada CuO, ZnO, MgO parçacıkları ve CuO+ZnO, MgO+CuO, MgO+ZnO hibrit parçacıklarının nano boyutta olacak şekilde saf su içerisine belirli oranlarda katılarak elde edilen nanoakışkanların termofiziksel özellikleri teorik olarak literatürdeki modeller kullanılarak belirlenmiştir. %0.5, %1, %2, %2.5 olacak şekilde farklı konsantrasyona sahip nanoakışkanların ısı iletkenlik, özgül ısı, viskozite değerleri hesaplanmış ve modeller karşılaştırılmıştır.

Thermal Behaviors of Thermophysical Properties of Hybrid Nanofluids

Abstract

Nanofluids and hybrid nanofluids containing nano-sized metal oxide particles are known to perform better in terms of thermal conductivity when used as working fluids in thermal systems. The thermal and physical properties of working fluids are important parameters in the solution of many heat and flow problems. In this study, the thermophysical properties of nanofluids obtained by adding certain ratios to the pure water such that CuO, ZnO, MgO particles and CuO + ZnO, MgO + CuO, MgO + ZnO hybrid particles are nano-sized were determined theoretically using the models in the literature. Thermal conductivity, specific heat, viscosity values of nanofluids with different concentrations such as 0.5%, 1%, 2% and 2.5% were calculated and the models were compared.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/06/2020
Düzeltilme: 21/08/2020
Kabul: 24/09/2020

Anahtar Kelimeler

Nanoakışkan
Nanoparçacık
Termofiziksel
Isıl performans
Hibrit

Keywords

Nanofluid
Nanoparticle
Thermophysical
Thermal performance
Hybrid

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji yaşamın her aşamasında gerekli olan temel bir ihtiyaç konumundadır. Gelişen teknoloji ve artan nüfus ile hem sanayi sektöründe hem de günlük yaşamın her noktasında enerjiye olan talep artmaktadır. Enerjiyi bir yerden bir yere transfer etmek için ısı boruları, ısı eşanjörleri gibi sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemlerde ısıyı taşımakla görevli çalışma akışkanları olarak su, yağ ve etilen glikol gibi geleneksel sıvılar kullanılmaktadır.

Isıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılan akışkanların ısı performansını etkileyen en önemli parametreler ısı iletkenlik, özgül ısı kapasitesi, viskozite vb. termofiziksel özelliklerdir. Saf su gibi yaygın geleneksel çalışma akışkanlarının ısı iletkenliğinin düşük olması nedeniyle ısı sistemlerinin performansında istenilen başarı sağlanamamaktadır. Isıl sistemlerde verimin artırılabilmesi amacıyla nano boyutta parçacıkların temel akışkan içerisine eklenerek oluşturulan nanoakışkanlar ile ilgili çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Günümüzde nano parçacıkların ısı transferi iyileştirmesi ile ilgili çalışmalar artarak devam etmektedir. Nanoakışkanların ısı transferi performansının iyileşmesini sağlayan bir takım fiziksel olaylar vardır. Katı metalin ısı iletkenliği baz akışkanından fazla olduğu için baz akışkan içerisine süspansiyon olarak katılan ince katı metaller, akışkanın ısı iletkenliğini artırmaktadır. Çalışma akışkanının içine süspansiyon edilen metal partiküller akışkanın yüzey alanını ve ısı kapasitesini artmasını sağlar. Parçacıklar

arasındaki etkileşim ve çarpışmalar sayesinde akışkanın yüzey alanda artış olur. Böylece tanecikler arası daha hızlı ısı transferi gerçekleşir.

Choi, nanometre boyutlarında katı partikül içeren çalışma akışkanlarını nano akışkan olarak tanımlayan ilk araştırmacı olarak bilinir. Choi vd., saf su, makina yağı, etilen glikol ve sıvı vakum pompası içine süspanse edilmiş nano parçacıklar kullanarak akışkanların termal iletkenliğini test etmişlerdir ve nano parçacıklı akışkan karışımlarının termal iletkenliklerinin baz sıvısına kıyasla daha yüksek olduğunu göstermişlerdir [1].

Han vd., çalışma akışkanı olarak farklı derişimdeki Al_2O_3 nanoakışkanı kullanarak, ısı eşansjöründe ısı transferi performansını geliştirmek amacıyla nanoakışkan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Isı transferinin, nano partiküllerin hacim ve sıcaklık konsantrasyonlarındaki artış ile arttığını belirtmişlerdir [2].

Ardekani vd., iki farklı nanoakışkan kullanarak, nanoakışkanların ısı aktarım özelliklerini türbülanslı akış için deneysel olarak incelemişlerdir. Nanoparçacık hacim konsantrasyonu gibi geometrik parametrelerin akıştaki etkilerini araştırmışlardır. Nanoakışkanların viskozitesini ve ısı iletkenliğini farklı hacimlerde ve sıcaklıklarda deneysel olarak gözlemlemişlerdir [3].

Teng vd., nanoakışkan ile şarj edilmiş ısı borusunun ısı veriminin artırılmasını incelemişlerdir. Çalışma akışkanının şarj miktarının, ısı borusunun eğim açısının ve nano partiküllerin ağırlık oranlarının, ısı borusunun ısı verimi üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. Deneysel sonuçlara göre, ısı borusunun optimum koşulu nano parçacıkların %1 derişimde iken olduğunu gözlemlemişlerdir [4].

Anitha vd., $(Al_2O_3+Cu)/su$ hibrit nanoakışkanının nanoparçacık hacim konsantrasyonunun, ısı eşanjörlerinde ısı transfer performansına etkisini araştırmışlardır. Hibrit nanoakışkan kullanılan sistemler için geleneksel akışkanlara oranla, yüksek ısı transfer performansı elde edilebileceğini belirtmişlerdir [5].

Sundar vd., su ve etilen glikolü temel akışkan olarak kullanmış ve içerisine GrO ve Co_3O_4 'den oluşan hibrit nanoparçacıkların eklenmesi ile hazırlanan nanoakışkanın termofiziksel özelliklerini araştırmışlardır [6].

Murshed vd., TiO_2 nanoparçacıkları içeren ve temel akışkanı silikon yağı olan nanoakışkanın termofiziksel özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Nanoakışkanın viskozitenin hacim konsantrasyonunun artışı ile arttığını, ancak artan sıcaklıkla da doğrusal olmayan bir şekilde azaldığını belirtmişlerdir [7].

Turgut vd., %3 hacimsel konsantrasyonlu TiO_2 – su nanoakışkanının 13-55 °C sıcaklık aralığında ısı iletkenlik ve viskozitede olan değişimi araştırmışlardır. Sonuçlar, termal iletkenliğin partikül hacminin artışıyla arttığını aynı zamanda viskozitede de artışın çok fazla olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, nanoakışkan viskozitesindeki artışın ısı iletkenlikteki artıştan çok daha fazla olduğunu böylece pompalama maliyetinin de artacağını göstermişlerdir. Sıcaklığın artması ile viskozitenin azaldığını belirtmişlerdir [8].

Ghasemi vd., yaptıkları çalışmada CuO nano parçacıklarının kütle konsantrasyonunun ve sıcaklığın sıvı parafin bazlı nanoakışkanın dinamik viskozitesi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Nanoparçacık derişimin artmasıyla, nanoakışkanın dinamik viskozitesinin temel akışkana göre arttığını ve sıcaklığın artması ile de nanoakışkanın viskozitesinin önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir [9].

Tiwari vd., CeO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 nano parçacıkları içeren nanoakışkanlar kullanarak deneysel olarak ısı transferi performanslarını karşılaştırmışlardır. Baz akışkan üzerindeki en yüksek ısı transferi değerini elde etmek amacıyla optimum parçacık konsantrasyonları belirlemişlerdir. Çalışmada, CeO_2/su nanoakışkanının, çalışılan nanoakışkanlar içinde daha düşük optimum konsantrasyonla en iyi performansı verdiğini belirtmişlerdir [10].

Onyiriuka vd., bu çalışmada, mango kabuğundan yapılan yeni bir nano-sıvı sınıfının ısı transferi özelliklerini sayısal olarak araştırmışlardır. Sonuç olarak, nanoakışkanın ısı transfer katsayısının temel akışkaninkinden yaklaşık iki kat daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir [11].

Wang vd., karbon nanotüpten oluşan nanoakışkanın nano parçacık boyutu ve sıcaklığın özgül ısı kapasitesine etkisini araştırmıştır. Özgül ısının belirli bir sıcaklıkta nano parçacık boyut ve şekline bağlı olmadığına sonucuna ulaşmışlardır [12].

Bu çalışmada CuO/su , ZnO/su , MgO/su , $(MgO+ZnO)/su$, $(CuO+ZnO)/su$ ve $(MgO+CuO)/su$ hibrit nano akışkanlarının termofiziksel özellikleri olan yoğunluk, özgül ısı, viskozite ve ısı iletkenlik değerlerinin

tespit edilmesi ve literatürdeki modellerin değişen parçacık hacim konsantrasyonuna göre karşılaştırılması amaçlanmıştır. Özgün tarafı; CuO/su, ZnO/su, MgO/su nanoakışkanlar ile (MgO+ZnO)/su, (CuO+ZnO)/su ve (MgO+CuO)/su hibrit nanoakışkanlarının termofiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan modellerin birlikte karşılaştırılmış olmasıdır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Isı transferi uygulamalarında nanoakışkan kullanılmasının sistemin performansı üzerindeki olumlu etkilerini gören araştırmacılar, baz akışkan içerisine farklı nano parçacık kombinasyonlarını ekleyip kullanmayı denemişlerdir. ZnO, MgO, CuO gibi nanoakışkanlar, düşük yoğunluklu ve yüksek kararlılık sağlayan parçacıkların temel akışkanlar ile oluşturdukları süspansiyonlardır. Bu nano parçacıklar daha düşük maliyetli ve kolay erişilebilir olduklarından dolayı literatürdeki birçok çalışmada yer almaktadır.

Nano parçacıkların termal iletkenliğinde daha fazla iyileştirme, iki veya daha fazla sayıda farklı nano parçacıkların hibrit haline gelmesi ile elde edilebilmekte ve hazırlanan bu yeni bileşik halindeki nanopartiküller, hibrit nanopartiküller olarak adlandırılmaktadır. Hibrit nano parçacıkların sentezlenmesi için kullanılan mekanik ve kimyasal yöntemler geliştirilmiştir. Hibrit nanoakışkanlar, mono nanoakışkanların uzantısı olup hibrit nano parçacıkların temel sıvı içerisinde süspansiyonu ile elde edilir. Hibrit nanoakışkanların kullanmanın asıl amacı, tek çeşit nano parçacık içeren nano akışkanlara göre daha yüksek termal iletkenlik elde edilmesi ile ısıl performansta artış sağlanmasıdır.

2.1. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri ve kaynak araştırması (Thermophysical properties of nanofluids and literature research)

Nanoakışkanların ısıl iletkenliği, viskozitesi, özgül ısısı gibi termofiziksel özellikleri parçacık şekli, parçacık boyutu, hacim oranı, sıcaklık, yüzey aktif maddeler, kayma hızı, partikül toplanması gibi birçok parametre tarafından etkilenmektedir.

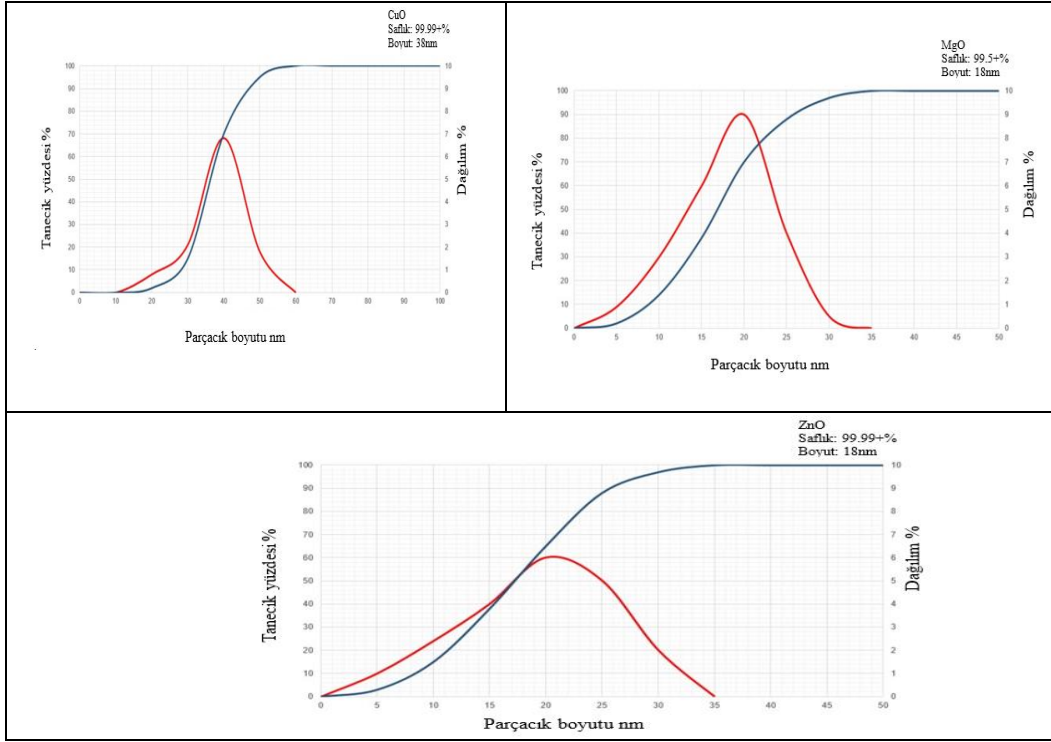
Nano parçacıkların fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 2’ de nanoakışkanların fiziksel özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalara genel bir bakış sunulmaktadır. Şekil 1’de ise nano parçacıkların parçacık boyutu dağılım grafiği verilmiştir. Şekil 2’de nano parçacıkların SEM görüntüleri verilmiştir.

Tablo 1. Nano parçacıkların fiziksel özellikleri

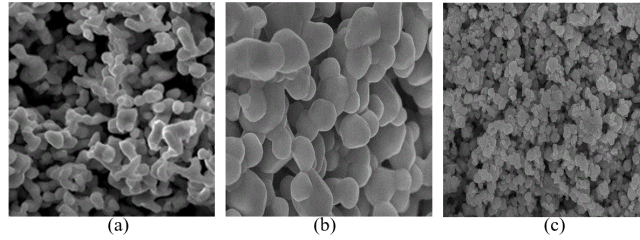
Nano parçacık	Safılık (%)	Ortalama parça boyutu (nm)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl iletkenlik (W / mK)	Özgül ısı (J / kgK)
CuO	99.99%	38	6320	32.9	531
ZnO	99.99+%	18	5500	23.4	494
MgO	99.5+%	18	3580	60	877

Tablo 2. Nanoakışkanlarda Termofiziksel Özellikler Üzerine Yapılan Çalışmalar

YAZAR	KULLANILAN NANOAKIŞKAN	PARAMETRE	ÖZET
Anitha vd. [5]	(Al ₂ O ₃ +Cu)/su	Parçacık hacim konsantrasyonu	Hibrit nanoakışkan kullanılan sistemler için geleneksel akışkanlara oranla, yüksek ısı transfer performansı elde edilebileceği belirtilmiştir.
Ghasemi vd. [9]	CuO/sıvı parafin	Sıcaklık, parçacık hacim konsantrasyonu	Nanoparçacık derişimin artmasıyla, nanoakışkanın dinamik viskozitesinin temel akışkana göre arttığı ve sıcaklığın artması ile de nanoakışkanın viskozitesinin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.
Sundar vd. [13]	Hibrit	Parçacık hacim konsantrasyonu, sürtünme faktörü, sıcaklık	Hibrit nanoakışkanların tek tip parçacıklı karışımlardan daha yüksek termal iletkenliğe ve viskoziteye sahip oldukları belirtilmiştir. Ayrıca hibrit nanoakışkanların, diğer çalışma sıvılarından daha yüksek ısı transfer katsayılarına sahip olduğu belirlenmiştir.
Nguyen vd. [14]	Al ₂ O ₃ /su ve CuO/su	Sıcaklık, parçacık hacim konsantrasyonu, tanecik boyutu	Her iki nanoakışkan için viskozite, hacimsel konsantrasyona bağlı olarak artış göstermiş olup, CuO/Su nanoakışkanının en fazla artış gösterdiği belirlenmiştir.
Pastoriza-Gallego vd. [15]	CuO/su	Parçacık hacim konsantrasyonu, sıcaklık, parçacık boyutu	Viskozite farklı sıcaklık değerleri ve parçacıkların farklı hacimsel konsantrasyonlarda araştırılmıştır. Ortalama parçacık çapı daha küçük olan nanoakışkanın viskozitesinin, çapı büyük olan nanoakışkana kıyasla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.
Suganthi vd. [16]	ZnO	Sıcaklık	Nanoakışkanının farklı sıcaklık değerleri arasında viskozitesini araştırılmıştır. Sıcaklık ile viskozitenin ters orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir.
Saholi vd. [17]	CuO/etilen glikol ve CuO/su	Parçacık hacim konsantrasyonu	Temel akışkana eklenen nano parçacıkların miktarı arttıkça, termal iletkenlikte de artış meydana geldiği belirtilmiştir. Nanoparçacık miktarı arttıkça zamanla nanoakışkanın kararsız hale gelerek akışkanın termal iletkenliğinin azaldığı gözlemlenmiştir.
Nadooshan. [18]	ZnO/su ve ZnO/etilen glikol	Parçacık hacim konsantrasyonu	Isıl iletkenliğin, nanopartikül konsantrasyonu arttıkça artış gösterdiği belirtilmiştir.
Kim vd. [19]	ZnO/su	Parçacık hacim konsantrasyonu, parçacık boyutu	Nanoparçacık boyutunun azalmasıyla, termal iletkenliğin artış gösterdiği belirlenmiştir.
Esfe vd. [20]	(Cu+TiO ₂)/su, MgO/su ve MgO/etilen glikol	Parçacık hacim konsantrasyonu, sıcaklık	Nanoakışkanın ısıl iletkenliğinin, katı hacim konsantrasyonu ve sıcaklığın artması ile arttığı gösterilmiştir.
Efse vd. [21]	MgO/su	Parçacık hacim konsantrasyonu	Nanoakışkanın basınç düşüşünün temel akışkandan daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Nanoakışkan kullanımının gerekli pompalama gücünde çok büyük miktarlarda artışa neden olmadan ısı transferini arttırdığı gözlemlenmiştir.
Akılı vd. [29]	(TiO ₂ +CuO)/etilen glikol	Parçacık hacim konsantrasyonu	Hibrit nanoakışkanların etilen glikol baz akışkanı ile kıyaslandığında ısıl iletkenlikte maksimum artış elde edildiği belirtilmiştir.
Mousavi vd. [30]	(MgO+TiO ₂)/su	Parçacık hacim konsantrasyonu, sıcaklık	Hibrit nanoakışkanların dinamik viskozitesinin sıcaklığın ve hacimsel derişimin artması ile azaldığı belirtilmiştir.



Şekil 1. Parçacık boyutu dağılım grafikleri



Şekil 2. Nano parçacıkların SEM görüntüleri (a) MgO (b) ZnO (c) CuO (SEM images of nanoparticles (a) MgO (b) ZnO (c) CuO)

2.1.1 Isıl iletkenlik (Thermal conductivity)

Akışkan ya da parçacığın ısıyı sıcak bölgeden alıp daha soğuk bölgeye doğru iletebilme kapasitesi ısı iletkenlik olarak tanımlanır. Nanoakışkan kullanmanın nedeni; ısıyı taşıyabilme özelliği daha yüksek olan ısı transfer akışkanı ile çalışma ihtiyacıdır ve nanoakışkanların termal iletkenlik değerleri, süspansiyonların performanslarını göstermeleri açısından oldukça önemlidir. Hibrit nanoakışkanların kullanılmasıyla, tek çeşit nano parçacık içeren nano akışkanlara kıyasla daha yüksek termal iletkenlik elde edilmesi beklenmektedir.

Isı transferi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan nanoakışkanın ısı iletim değeri; nano parçacığın hacim konsantrasyonu, nano parçacık şekli, parçacık boyutu, baz sıvının türü, kararlılık, sıcaklık, pH değeri vb. parametrelere bağlı olarak değişir. Literatüre bakıldığında araştırmacılar tarafından hem oksit hem hibrit nanoakışkanların ısı iletkenlik değerlerine ulaşabilmek için çeşitli teorik çalışmalar yapılmış, birçok model geliştirilmiştir.

1881 yılında Maxwell tarafından oluşturulan ısı iletim modeli, diğerlerine oranla daha büyük parçacıklara sahip katı-sıvı karışımı için öne sürülen ilk modellerden biridir ve küre biçimli nano parçacıkların temel akışkan içindeki süspansiyonu için geliştirilmiştir [14].

Tablo 3. Nanoakışkanlar için termal iletkenlik modelleri [22]

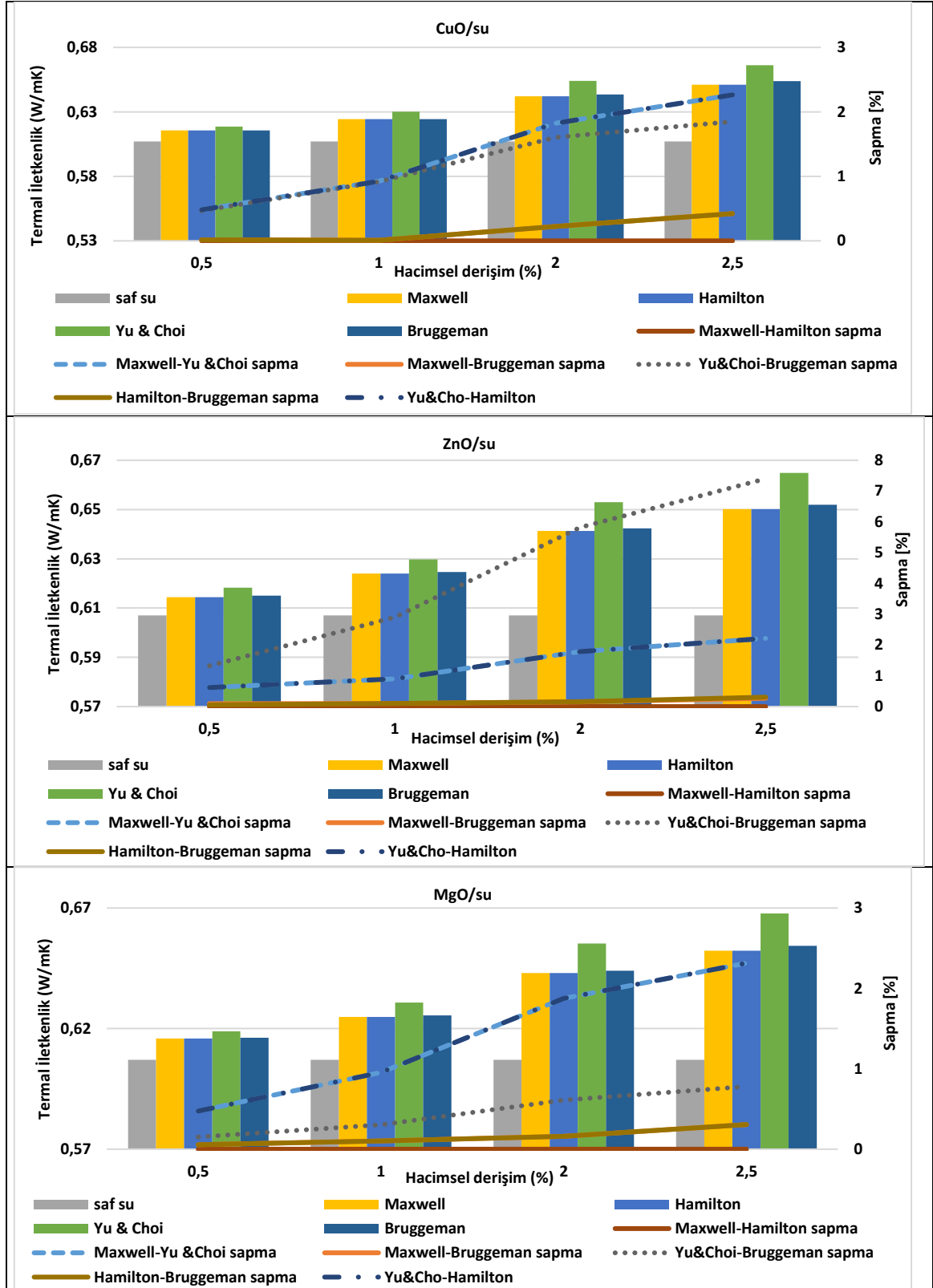
Model	İfade	Açıklama
Maxwell	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l + 2(k_p - k_l)\phi}{k_p + 2k_l - 2(k_p - k_l)\phi}$	Küresel partiküller için geçerlidir.
Hamilton-Crosser	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + (n-1)k_l - (n-1)(k_l - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_l + (k_l - k_p)\phi}$	Küresel ve küresel olmayan partiküller alınmıştır; küresel partiküller için n=3, silindirik partiküller için n=6
Wasp	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l - 2(k_l - k_p)\phi}{k_p + 2k_l + (k_l - k_p)\phi}$	Katı-sıvı karışımların ısı iletkenliğini hesaplamak için önerilmiştir.
Yu-Choi	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l + (k_p - k_l)(1 + \beta)^3 \phi}{k_p + 2k_l - (k_p - k_l)(1 + \beta)^3 \phi}$	İki fazlı karışımların etkili ısı iletkenliğini hesaplamak için alternatif bir teodir. $\beta=1$
Bruggeman	$k_e = \frac{1}{4}[(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_l] + \frac{k_l}{4}\sqrt{\Delta}$ $\Delta = [(3\phi - 1)^2(k_p/k_l)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2)(k_p/k_l)]$	Homojen küresel partiküller içeren iki fazlı karışımlar için önerilmiştir.

Tablo 4. Hibrit nanoakışkanlar için termal iletkenlik modelleri [23]

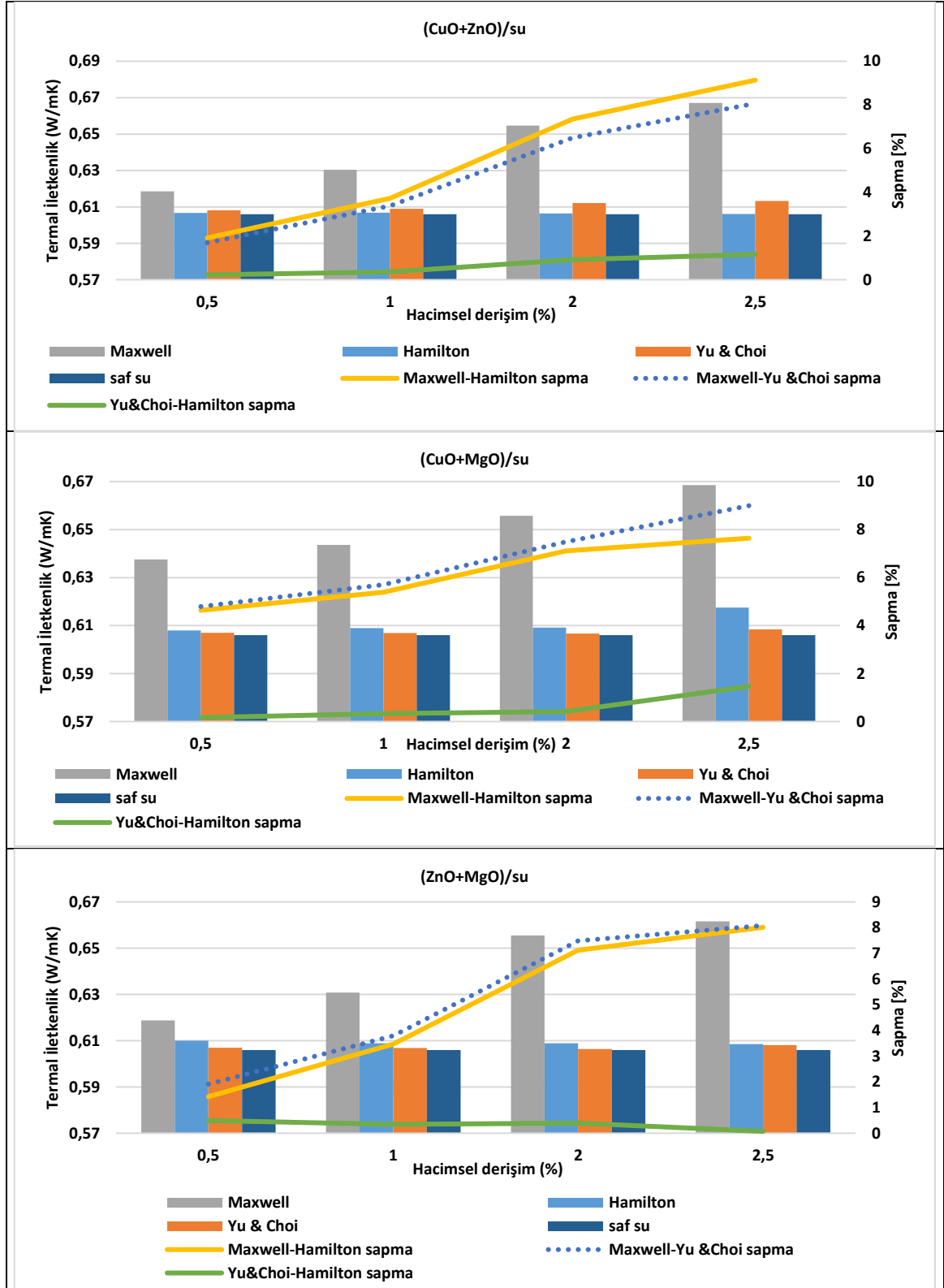
Model	Formülasyon
Maxwell	$k_{hn} = k_b \frac{\left[\frac{(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2})}{\phi_{hnf}} + 2k_b + 2(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}) - 2\phi k_b \right]}{\left(\frac{\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}}{\phi_{hn}} + 2k_b - 2(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}) - k_b \right)}$
Hamilton-Crosser	$\frac{k_e}{k_b} = \frac{\left[\frac{(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2})}{\phi_{hn}} + 2k_b - 2(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}) - 2\phi_{hn} \right]}{\left(\frac{\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}}{\phi_{hn}} + 2k_b + 2(\phi_{np1}k_{np1} - \phi_{np2}k_{np2}) - \phi_{hn} \right)}$
Yu-Choi	$\frac{k_e}{k_b} = \frac{\left[\frac{(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2})}{\phi_{hn}} + 2k_b - 2(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2})(1 + \beta)^3 \phi_{hn} \right]}{\left(\frac{\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}}{\phi_{hn}} - 2k_b - 2(\phi_{np1}k_{np1} - \phi_{np2}k_{np2})(1 + \beta)^3 \phi_{hn} \right)}$

Tablo 3 ve 4'teki denklemlerde geçen k_e karışımın efektif ısı iletkenliği, k_{np} partikülün ısı iletkenliği, k_b temel akışkanın ısı iletkenliği, ϕ partikülün hacimsel oranıdır. CuO, ZnO ve MgO nano parçacıklarının saf su ile süspansiyonu ile elde edilen oksit ve hibrit nanoakışkanların hacimsel derişime bağlı olarak hesaplanmış literatür modellerinin termal iletkenlik ve sapma değerlerinin karşılaştırılması Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Modeller arasındaki ısı iletkenlik sapma değerinin formülü Eşitlik 1' de verilmiştir.

$$\text{Sapma değeri } (\varepsilon_k) = \frac{(\varepsilon_{model1} - \varepsilon_{model2}) \times 100}{\varepsilon_{model1}}$$



Şekil 3. Oksit nanoakışkanların hacimsel derişime bağı olarak hesaplanmış literatür modellerinin termal iletkenlik ve sapma değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4. Hibrit nanoakışkanların hacimsel derişime bağı olarak hesaplanmış literatür modellerinin termal iletkenlik ve sapma değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3 ve Şekil 4'te %0.5-2.5 hacimsel derişimlere sahip oksit ve hibrit nanoakışkanlarının literatürdeki mevcut modellere göre termal iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Oksit nanoakışkanlarda en yüksek termal iletkenlik Yu & Choi modeline aitken en düşük termal iletkenlik Bruggeman modelinden elde edilmiştir. Maxwell ve Hamilton modellerinden ise birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir.

Partiküllerin hacimsel derişimlerinin artışıyla ısı iletkenlik değeri artmıştır ve nanoakışkanların ısı iletkenlik değeri tüm karışım oranlarında temel akışkan olan saf suyun ısı iletkenlik değerinden fazladır.

Hibrit nanoakışkanlarda en yüksek termal iletkenlik her bir hacimsel derişimde Maxwell modeli ile elde edilmiştir. Literatüre bakıldığında hacimsel konsantrasyonla birlikte hibrit nanoakışkanlarda ısı iletkenlikte de artış sağlanması beklenmektedir [32]. Hibrit nanoakışkanının ısı iletkenliği bütün karışım oranlarında baz akışkanının ısı iletkenliğinden büyük olduğu gözlemlenmiştir.

2.1.2 Özgöl Isı Kapasitesi (Specific Heat Capacity)

Nanoakışkanlar için özgöl ısı; bir gram nanoakışkanın sıcaklığını 1 santigrat derece kadar arttıracak olan sıcaklık değeridir. Özgöl ısı kapasitesi ve yoğunluk, nanoakışkanlarda taşınım ile ısı transferini iyileştirmede, ısı depolamada ve ısı transfer hızını etkilemede önemli bir yere sahiptir. Özgöl ısının düşük olması, sıcaklığı artırmak için daha az enerji tüketimi yapılacak olduğunun göstergesidir. Nanoakışkanların özgöl ısı değerlerini elde edebilmek için literatürdeki geliştirilen modeller yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modeller Tablo 5' te ve Tablo 6' da verilmiştir.

Tablo 5. Nanoakışkanlar için özgöl ısı modelleri [24]

Model	Formülasyon
Xuan ve Roetzel	$c_{p\text{nanoakışkan}} = \frac{(1 - \varphi)(\rho c_p)_{\text{bazakışkan}} - \varphi(\rho c_p)_{\text{nanopartikül}}}{(1 - \varphi)(\rho)_{\text{bazakışkan}} + \varphi(\rho)_{\text{nanopartikül}}}$
Pak ve Cho	$c_{p\text{nanoakışkan}} = \varphi(c_p)_{\text{partikül}} + (1 - \varphi)(c_p)_{\text{bazakışkan}}$

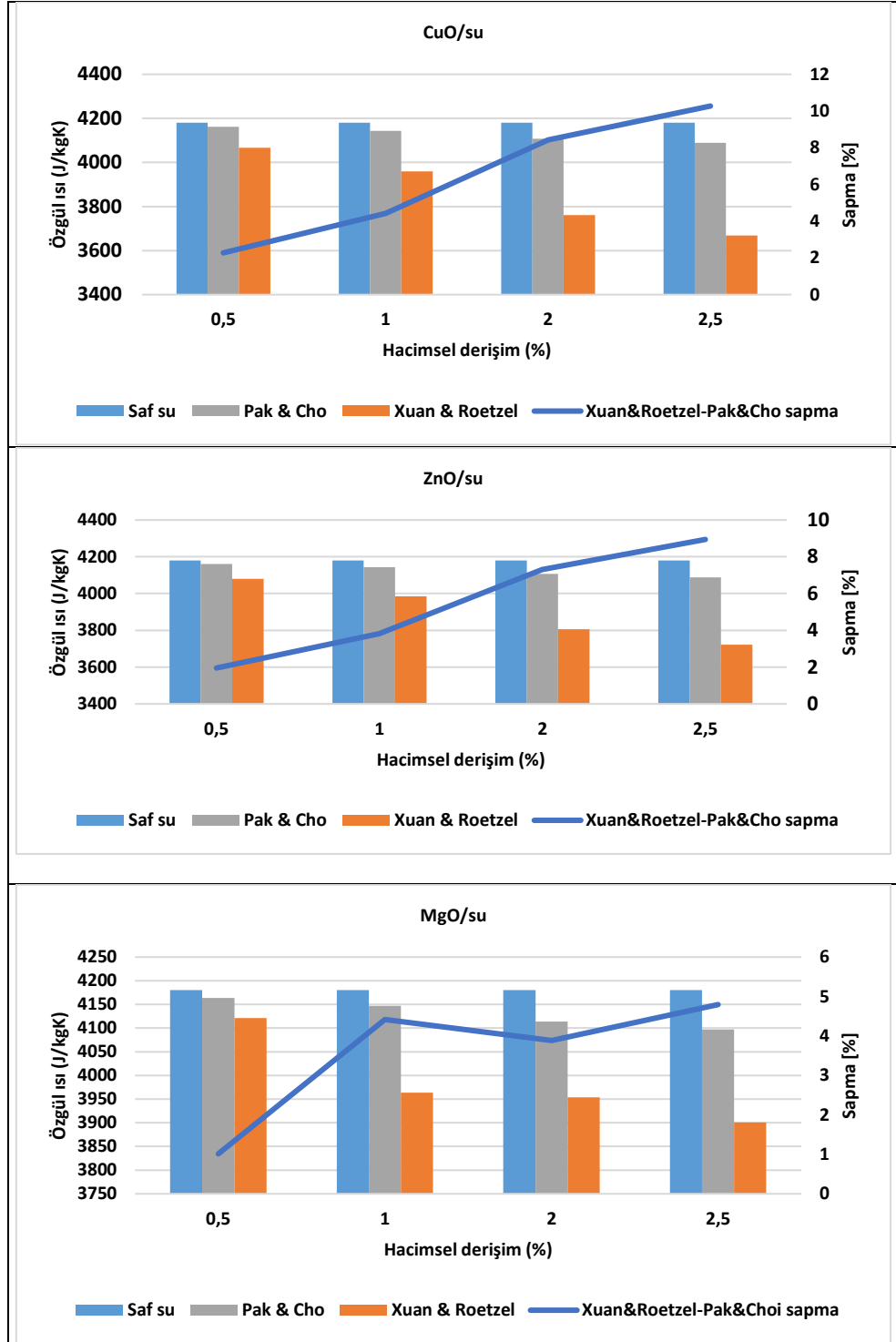
Tablo 6. Hibrit nanoakışkanlar için özgöl ısı modelleri [25]

Model	Formülasyon
Xuan ve Roetzel	$c_{phn} = (1 - \varphi)(c_p)_{cp\text{baz}} + \left(\frac{\varphi_{np1}}{2} \times c_{pnp1} + \frac{\varphi_{np2}}{2} \times c_{pnp2}\right)$
Pak ve Cho	$c_{phn} = [\varphi_{np1} c_{p, np1} + \varphi_{np2} c_{p, np2} + (1 - \varphi_{np1} - \varphi_{np2}) \rho_{\text{baz}} c_{\text{baz}}] / \rho_{hn}$

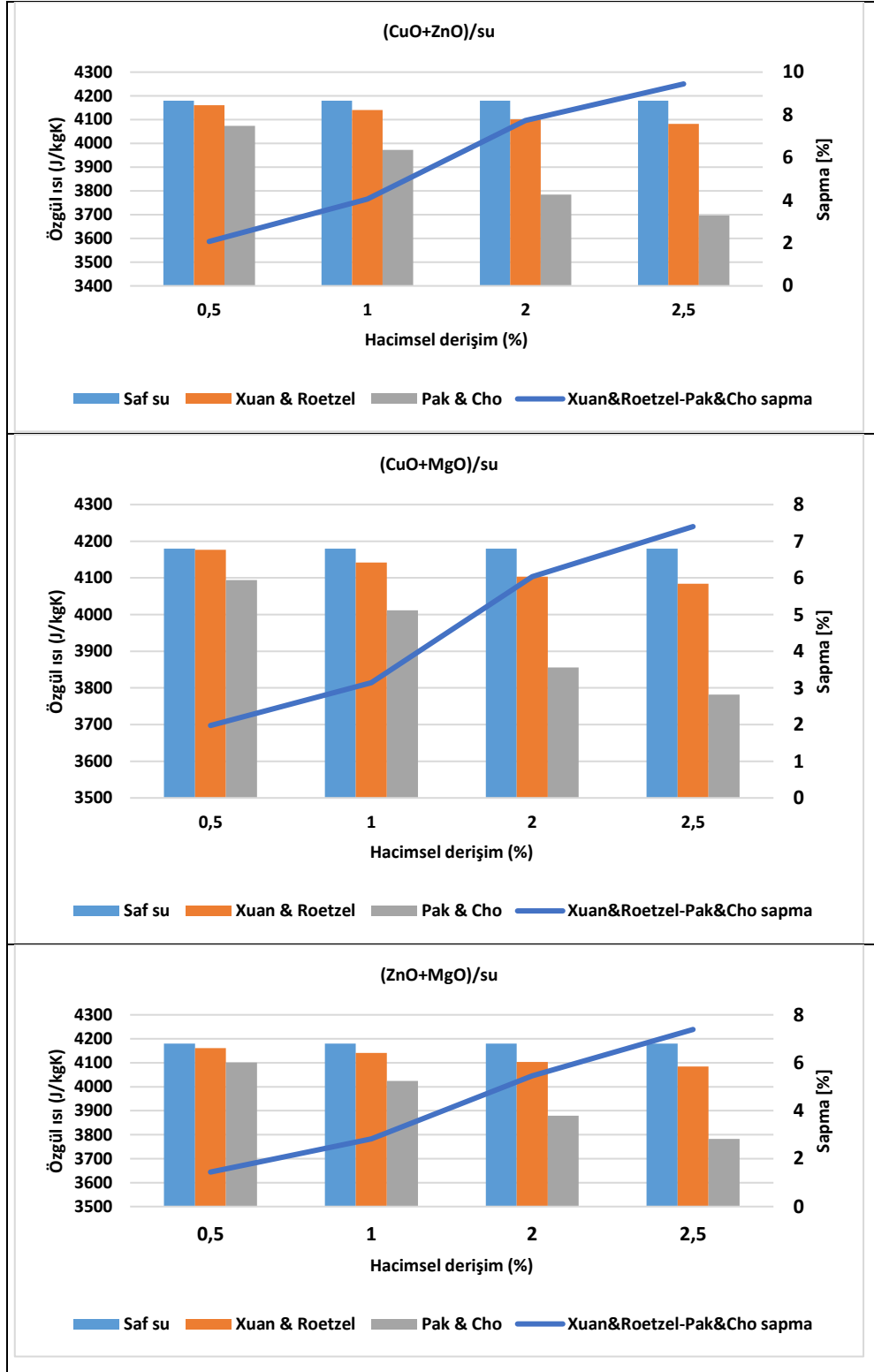
CuO, ZnO ve MgO nano parçacıklarının saf su ile süspansiyonu ile elde edilen oksit ve hibrit nanoakışkanların parçacık hacim konsantrasyonuna göre değişen özgöl ısı değerleri ve sapma değerlerinin literatür modellerinin karşılaştırılması Şekil 5 ve Şekil 6' da verilmiştir. Modeller arasındaki özgöl ısı sapma değeri formülü Eşitlik 2' de verilmiştir.

$$\text{Sapma değeri } (\varepsilon_{cp}) = \frac{(\varepsilon_{\text{model1}} - \varepsilon_{\text{model2}}) \times 100}{\varepsilon_{\text{model1}}} \quad 2$$

Şekil 5 ve Şekil 6' da %0.5-2.5 hacimsel derişimlere sahip oksit ve hibrit nanoakışkanlarının literatürdeki Pak&Cho ve Xuan&Roetzel modellerine göre özgöl ısı değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Oksit ve hibrit nanoakışkanlarının özgöl ısısının bütün karışım oranlarında baz akışkanın özgöl ısısından küçük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlara göre kullanılan bütün modellerde nanoakışkanların hacimsel derişimi arttığında özgöl ısı değerleri azalmaktadır. Literatüre bakıldığında hacimsel konsantrasyonla birlikte hibrit nanoakışkanlarda özgöl ısıda azalma sağlanması beklenmektedir [32].



Şekil 5. Oksit nanoakışkanların özgül ısı ve sapma değerlerinin hacimsel derişime bağılı olarak hesaplanmış literatür modellerinin karşılaştırılması



Şekil 6. Hibrit nanoakışkanların özgül ısı ve sapma değerlerinin hacimsel derişime bağılı olarak hesaplanmış literatür modellerinin karşılaştırılması

2.1.3 Viskozite (Viscosity)

Viskozite akışkanın akmaya gösterdiği iç dirençtir. Nanoakışkanlarda, zorlanmış taşınım esnasında basınç düşüşünü etkilemesi sebebiyle uygulamalarda ısı transferini iyileştirmekte kullanılan en etkili parametrelerden biri viskozitedir. Nano parçacıkların temel akışkana eklenmesiyle sıvının viskozite

değerinde bir takım değişimler meydana gelir. Viskozite değeri, ihtiyaç duyulan pompalama gücünü de doğrudan etkilediği için verimlilik uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Basınç düşüşü viskozite ile ilgili olduğundan, basınç düşüşünün artmasıyla pompalama gücü ihtiyacı da artar. Sıcaklık, kayma gerilimi, nano parçacıkların boyutu, kararlılığı artırmak için kullanılan yüzey aktifleştirici madde eklenmesi ve temel akışkanın cinsi viskoziteyi etkilemektedir. Örneğin akışkanların ısıtılıp sıcaklığının artması ile moleküllere enerji verilir ve moleküllerin gelişigüzel hareketi olan Brownian hareketi artar bununla birlikte molekülleri bir arada tutan Van der waals çekim kuvvetlerinin etkisi azalır. Sonuç olarak akışkanın kayma gerilmesine karşı gösterdiği direnç azalır ve viskozite değeri düşer [27].

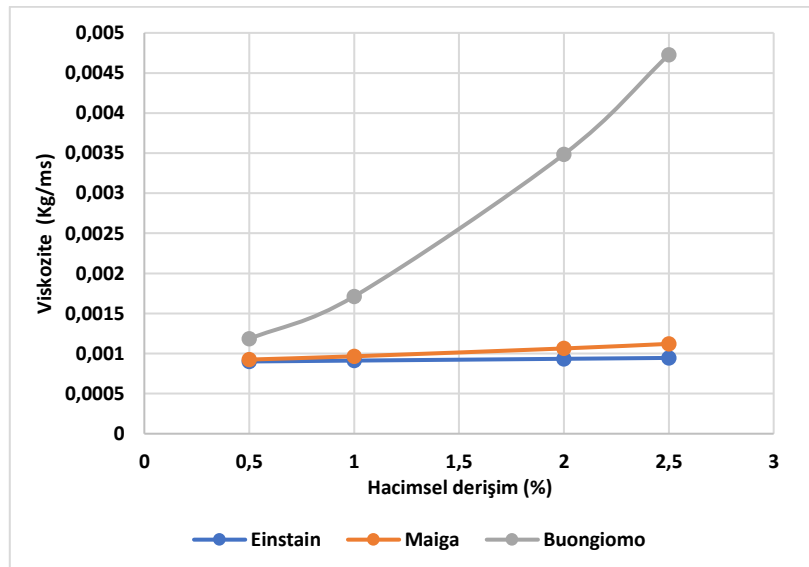
Viskoziteye etki eden diğer bir etken de nanoparçacık hacimsel konsantrasyonudur ve konsantrasyon arttıkça viskozite değerinin de arttığı ortaya çıkmıştır [31]. Literatüre bakıldığında, nanoakışkanların viskozite değerlerine ulaşabilmek için araştırmacılar tarafından çeşitli teorik çalışmalar yapılmış ve modeller geliştirilmiştir. Einstein, çok küçük hacimsel oranlardaki küresel parçacıklar için bir model geliştirmiştir. Bu modeller Tablo 7’de verilmiştir. Şekil 7’de nanoakışkanların viskozite değerlerinin literatür modellerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Nanoakışkanların viskozitesi üzerine az sayıda çalışma yapılmış olsa da bu termofiziksel özellik ısı iletkenliği kadar önemlidir çünkü akış ve ısı transfer özelliklerini etkileyebilmektedir.

Şekil 7 Einstein, Maiga ve Buongiorno modellerinin farklı derişimlerdeki viskozite değişimini göstermektedir.

Tablo 7. Nanoakışkanlar için viskozite modelleri [26]

Model	Formülasyon
Einstein	$\frac{\mu_{nanoakışkan}}{\mu_{bazakışkan}} = 1 + 2.5\phi$
Maiga	$\mu_{nanoakışkan} = \mu_{bazakışkan}(1 + 7.3\phi + 123\phi^2)$
Buongiorno	$\mu_{nanoakışkan} = \mu_{bazakışkan}(1 + 39.11\phi - 533.9\phi^2)$



Şekil 7. Nanoakışkanların viskozite değerlerinin literatür modellerinin karşılaştırılması

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Nano parçacıklar, ısı sistemlerinin efektifliğinde performans sağlayan yeni nesil nano teknoloji ürünü malzemelerdir. Nano parçacıklar çok küçük boyutlu olduklarından, gerekli koşulların da sağlanmasıyla kullanıldıkları sistemlerde üstün performans göstermektedirler [28]. Bu çalışmada CuO, ZnO, MgO metal oksit parçacıkları ve 1:1 oranında karışımla elde edilen CuO+ZnO, MgO+CuO, MgO+ZnO hibrit parçacıkları nano boyutta olacak şekilde hazırlanan ve saf su içerisine belirli oranlarda katılarak nanoakışkanlar elde edilerek literatürdeki modellere göre termofiziksel özellikleri teorik olarak belirlenmiştir ve bu modeller arasındaki sapma değerleri hesaplanarak modeller arası karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 8 ve Tablo 9’ da oksit ve hibrit nanoakışkanlar için literatür modellerinin hacimsel derişime bağlı olarak hesaplanmış termal iletkenliklerinin sapma değerleri görülmektedir. Bu sapma değerleri modellerden elde edilen sonuçlar arasındaki farkı belirtiyor olup hangi modelin daha gerçekçi sonuç vereceği hakkında bilgi vermektedir.

Tablo 8’deki oksit nanoakışkanlarda modeller arasındaki farkın değerlendirildiği sapma değerlerine bakıldığında her bir derişimde Maxwell ve Hamilton modelleri ile birbirine çok yakın sonuçlar alındığı açıkça gözükmektedir. En düşük sapma değerine sahip olan bu modeller literatürde de en çok tercih edilen modellerdir [37]. Mousavi vd. yaptıkları çalışmada deneysel verilerle uyumlu olan bu modellerin termal iletkenlik hesabında kullanılabilirliğini göstermişlerdir [30].

Tablo 9’daki hibrit nanoakışkanlarda modeller arasındaki farkın değerlendirildiği sapma değerlerine bakıldığında her bir derişimde Yu&Cho ve Hamilton modelleri ile en düşük sapma değerlerinin elde edildiği gözükmektedir. En düşük sapma değerine sahip olan bu modeller literatürde de en çok tercih edilen modellerdir. Chandrasekar vd. yaptıkları çalışmada ısı iletkenlik hesabında deneysel veriler ile Maxwell ve Hamilton modellerini karşılaştırmış ve bu modellerden faydalanılabileceğini belirtmişlerdir [31]. Avsec vd. istatistiksel nanomekanik temelinde nanoakışkanlar için termal iletkenlik, viskozite ve termodinamik özelliklerin hesaplanması ile ilgili olan çalışmalarında bu modelleri kullanmış olup, sonuçlar ile deneysel verileri karşılaştırmış ve nispeten benzer veriler elde etmişlerdir [33].

Şekil 4 ve Şekil 3’deki oksit ve hibrit nanoakışkanların ısı iletkenlik değerleri kıyaslandığında bariz bir fark görülmemektedir. Hacimsel derişim artarken her bir modelde termal iletkenlikte artış sağlanmıştır. Takabi vd. ısı transfer performansının hibrit nanoakışkan kullanılarak artırılması ile ilgili araştırmalarında ısı iletim katsayısı gibi termofiziksel özelliklerin belirlenmesinde bu modellerin, özellikle hacimsel derişim artarken hibrit akışkanları küçümsediğini deneysel sonuçlarla ortaya koymuşlardır ve hibrit nanoakışkanlar için kullanılan modellerin geliştirilmesi gerektiği üstünde durmuşlardır [36].

Chandrasekar vd. Al₂O₃/su nanoakışkanların termal iletkenliği ve viskozitesi için iyi kurulmuş Maxwell ve Einstein modellerine başvurmadan önerilen diğer modeller için, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, bu modellerle hesaplanan termal iletkenlik ve viskozite modelleri, hacim konsantrasyonları sırasıyla %3 ve %5 olduğunda Al₂O₃/su nanoakışkanın termal iletkenlik ve viskozitesinin tahmini için kullanılabilir olduğunu açıklamışlardır. Einstein dışındaki viskozite modelleri için, sıvı/parçacık özellikleri açısından korelasyonlar geliştirilerek daha da geliştirilebileceğini belirtmişlerdir [31].

Şekil 5 ve Şekil 6’da verilen oksit ve hibrit nanoakışkanların özgül ısı değerlerine bakıldığında oksit nanoakışkanlarda Pak & Cho modelinden daha yüksek değerler elde edilirken hibrit nanoakışkanlarda Xuan & Roetzel modelinde daha yüksek değerlere ulaşılmıştır. Öcal S., yaptığı deneysel çalışmada Pak & Cho ve Xuan & Roetzel modellerini deney sonuçlarıyla kıyaslamış ve birbirine yakın değerler bulmuştur [34].

Tablo 8. Oksit nanoakışkanlar için literatür modellerinin hacimsel derişime bağı olarak hesaplanmış termal iletkenliklerinin sapma değerleri

Derişim	Akışkan	Model	Maxwell	Hamilton	Yu&Cho	Bruggeman
%0.5	CuO/su	Maxwell	0	0	%0.5	%0.02
		Hamilton	0	0	%0.5	%0.02
		Yu&Cho	%0.5	%0.5	0	%0.5
		Bruggeman	%0.02	%0.02	%0.5	0
	ZnO/su	Maxwell	0	0	%0.6	%0.09
		Hamilton	0	0	%0.6	%0.09
		Yu&Cho	%0.6	%0.6	0	%1.3
		Bruggeman	%0.09	%0.09	%1.3	0
	MgO/su	Maxwell	0	0	%0.5	%0.06
		Hamilton	0	0	%0.5	%0.06
		Yu&Cho	%0.5	%0.5	0	%0.2
		Bruggeman	%0.06	%0.06	%0.2	0
%1.0	CuO/su	Maxwell	0	0	%0.9	%0.01
		Hamilton	0	0	%0.92	%0.01
		Yu&Cho	%0.9	%0.92	0	%0.91
		Bruggeman	%0.01	%0.01	%0.91	0
	ZnO/su	Maxwell	0	0	%0.9	%0.1
		Hamilton	0	0	%0.9	%0.1
		Yu&Cho	%0.9	%0.9	0	%2.9
		Bruggeman	%0.1	%0.1	%2.9	0
	MgO/su	Maxwell	0	0	1%	%0.1
		Hamilton	0	0	1%	%0.1
		Yu&Cho	1%	1%	0	%0.3
		Bruggeman	%0.1	%0.1	%0.3	0
%2.0	CuO/su	Maxwell	0	0	%1.8	%0.2
		Hamilton	0	0	%1.8	%0.2
		Yu&Cho	%6.5	%0.9	0	%1.6
		Bruggeman	%0.2	%0.2	%1.6	0
	ZnO/su	Maxwell	0	0	%7.5	%0.1
		Hamilton	0	0	%0.4	%0.1
		Yu&Cho	%7.5	%0.4	0	%5.8
		Bruggeman	%0.1	%0.1	%5.8	0
	MgO/su	Maxwell	0	0	%7.5	%0.2
		Hamilton	0	0	%0.4	%0.2
		Yu&Cho	%7.5	%0.4	0	%0.6
		Bruggeman	%0.2	%0.2	%0.6	0
%2.5	CuO/su	Maxwell	0	0	%2.3	%0.4
		Hamilton	0	0	%2.3	%0.4
		Yu&Cho	%2.3	%2.3	0	%1.8
		Bruggeman	%0.4	%0.4	%1.8	0
	ZnO/su	Maxwell	0	0	%2.2	%0.3
		Hamilton	0	0	%2.2	%0.3
		Yu&Cho	%2.2	%2.2	0	%7.4
		Bruggeman	%0.3	%0.3	%7.4	0
	MgO/su	Maxwell	0	0	%2.3	%0.3
		Hamilton	0	0	%2.3	%0.3
		Yu&Cho	%2.3	%2.3	0	%0.8
		Bruggeman	%0.3	%0.3	%0.8	0

Tablo 9. Hibrit nanoakışkanlar için literatür modellerinin hacimsel derişime bağı olarak hesaplanmış termal iletkenliklerinin sapma değerleri

Derişim	Akışkan	Model	Maxwell	Hamilton	Yu&Cho
%0.5	(CuO+ZnO)/su	Maxwell	0	%1.9	%1.7
		Hamilton	%1.9	0	%0.2
		Yu&Cho	%1.7	%0.2	0
	(CuO+MgO)/su	Maxwell	0	%4.6	%4.8
		Hamilton	%4.6	0	%0.2
		Yu&Cho	%4.8	%0.2	0
	(ZnO+MgO)/su	Maxwell	0	%1.4	%1.9
		Hamilton	%1.4	0	%0.5
		Yu&Cho	%1.9	%0.5	0
%1.0	(CuO+ZnO)/su	Maxwell	0	%3.7	%3.4
		Hamilton	%3.7	0	%0.4
		Yu&Cho	%3.4	%0.4	0
	(CuO+MgO)/su	Maxwell	0	%5.4	%5.7
		Hamilton	%5.4	0	%0.3
		Yu&Cho	%5.7	%0.3	0
	(ZnO+MgO)/su	Maxwell	0	%3.5	%3.8
		Hamilton	%3.5	0	%0.3
		Yu&Cho	%3.8	%0.3	0
%2.0	(CuO+ZnO)/su	Maxwell	0	%7.4	%6.5
		Hamilton	%7.4	0	%0.9
		Yu&Cho	%6.5	%0.9	0
	(CuO+MgO)/su	Maxwell	0	%7.1	%7.5
		Hamilton	%7.1	0	%0.4
		Yu&Cho	%7.5	%0.4	0
	(ZnO+MgO)/su	Maxwell	0	%7.1	%7.5
		Hamilton	%7.1	0	%0.4
		Yu&Cho	%7.5	%0.4	0
%2.5	(CuO+ZnO)/su	Maxwell	0	%9.1	%8
		Hamilton	%9.1	0	%1.2
		Yu&Cho	%8	%1.2	0
	(CuO+MgO)/su	Maxwell	0	%7.6	%8.9
		Hamilton	%7.6	0	%1.5
		Yu&Cho	%8.9	%1.5	0
	(ZnO+MgO)/su	Maxwell	0	%8	%8.1
		Hamilton	%8	0	%0.1
		Yu&Cho	%8.1	%0.1	0

Hacimsel derişim arttığında oksit ve hibrit nanoakışkanlarda özgül ısı değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Örneğin CuO/su nanoakışkanını %0.5, %1, %2, %2.5 hacimsel derişimlerde Pak&Cho modelinde sırasıyla 4161,8 J/kgK, 4143,5 J/kgK, 4107 J/kgK, 4088,8 J/kgK özgül ısı değerlerini almıştır. Xuan & Roetzel modelinde ise sırasıyla 4067 J/kgK, 3959,9 J/kgK, 3761,2 J/kgK, 3668,8 J/kgK değerlerini almıştır. Xuan&Roetzel-Pak&Cho sapma değerleri ise sırasıyla %2.3, %4.4, %8.4, %10.3 olarak elde edilmiştir. (CuO+ZnO)/su hibrit nanoakışkanını ise %0.5, %1, %2, %2.5 hacimsel derişimlerde Xuan & Roetzel modelinde sırasıyla 4160,4 J/kgK, 4140,8 J/kgK, 4101,5 J/kgK, 4081,9 J/kgK özgül ısı değerlerini almıştır. Pak&Cho modelinde ise sırasıyla 4073,9 J/kgK, 3972,9 J/kgK, 3784,3 J/kgK, 3696,3 J/kgK özgül ısı değerlerini almıştır. Xuan&Roetzel-Pak&Cho sapma değerleri ise sırasıyla %2.1, %4.1, %7.7, %9.4 olarak elde edilmiştir.

Oksit nanoakışkanlar ile hibrit nanoakışkanların özgül ısıları karşılaştırıldığında hibrit nanoakışkanların özgül ısı değerlerinin oksit nanoakışkanlardan daha yüksek değerlere sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 7’de verilen viskozite değeri hesabında kullanılan modeller incelendiğinde dinamik viskozitenin hacimsel derişim arttıkça arttığı görülmektedir. Yüksek viskozite artışı ısı sistemlerde istenmeyen bir etki yaratmaktadır. Hacimsel derişim arttıkça açık bir şekilde viskozitenin arttığı bilinmektedir dolayısıyla Einstein modelinde bu artış çok rahat gözlenebilmektedir. Maiga ve Buongiorno modelleri birbirine yakın değerler almıştır ve aradaki bu düşük sapma değeri ile daha çok tercih edilmektedir. Suresh vd., yaptıkları çalışmada hibrit nanoakışkanları için yüksek hacim konsantrasyonlarındaki verilen Einstein viskozite modelinin deneysel verilerle uyum sağlamadığını belirtmişlerdir [37].

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada CuO, ZnO, MgO parçacıkları ve CuO+ZnO, MgO+CuO, MgO+ZnO hibrit parçacıklarının nano boyutta olacak şekilde saf su içerisine belirli oranlarda katılarak elde edilen nanoakışkanların termofiziksel özellikleri teorik olarak literatürdeki modeller kullanılarak belirlenmiştir. Baz sıvı içindeki farklı konsantrasyonlardaki (%0.5, %1, %2, %2.5) nanoakışkanların ısı iletkenlik, özgül ısı, viskozite değerleri hesaplanmış ve modeller karşılaştırılmıştır.

- Nanoakışkanların içerisinde bulunan metal oksitler sayesinde ısı tutma ve taşıma kapasitesinin saf suya göre daha fazla olduğu görülmüştür. Hacimsel derişimin oranının artmasıyla nanoakışkanlar içerisinde bulunan nano parçacıkların birbirleriyle oluşturduğu etkileşim nedeniyle akışa karşı oluşan direncin arttığı dolayısıyla her bir modelde viskozitenin yükseldiği görülmüştür. Einstein modelinde bu artış çok rahat gözlenebilmektedir. Maiga ve Buongiorno modelleri aralarındaki düşük sapma değeri ile araştırmacılar tarafından daha çok tercih edilmektedir. Önceki çalışmalarda hibrit nanoakışkan için viskozite değerlerinin farklı baz akışkan oranlarında arttığı, artan sıcaklıkla ise azaldığı gözlemlenmiş olup bu durumun askıda kalan nanoparçacıkların oluşturduğu dirençten kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Dolayısıyla, endüstriyel uygulamalarda pompalama gücünden tasarruf sağlanması için viskozite değerinin optimal düzeyi belirlenmelidir [35].

- Oksit ve hibrit nanoakışkanın ısı iletkenliğinin bütün karışım oranlarında baz akışkanın ısı iletkenliğinden büyük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlara göre kullanılan bütün modellerde nanoakışkanların hacimsel derişimi arttığında özgül ısı değerleri azalmaktadır. Oksit nanoakışkanlarda modeller arasındaki farkın değerlendirildiği sapma değerlerine bakıldığında en düşük sapma değerine sahip olan Maxwell ve Hamilton modelleri, hibrit nanoakışkanlarda ise Yu&Cho ve Hamilton modelleri literatürde de en çok tercih edilen modeller olmaktadır.

- Termofiziksel özellikleri saf suya kıyasla daha üstün olan nanoakışkanların ısı borusu, ısı değiştiriciler gibi ısı sistemlerde kullanılması ile söz konusu sistemlerin veriminin çok daha yüksek olacağı gözlemlenmiştir.

- Sonraki çalışmalarda farklı konsantrasyonlarda farklı nano akışkanlar kullanılarak belirlenen termofiziksel özelliklerin performansa etkisi incelenebilir, deneysel çalışmalarla literatür modellerinin kıyaslanması üzerinde araştırmalar yapılabilir. Daha farklı nanoparçacık hacimsel oranları ve farklı sıcaklık değerlerinin termofiziksel özelliklere etkisi için ölçümler yapılabilir. Deneysel çalışma kontrollü olarak yapılmalı, akışkanın kararlılığı, kümeleşme, çökme gibi verimi etkileyen unsurlara dikkat edilmelidir. Su yerine farklı baz akışkanlar kullanılarak belirlenen termofiziksel özelliklerle performans değerlendirmesi yapılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Araştırma süresince destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Adnan SÖZEN’ e teşekkürlerimi sunarım.

SİMGELER VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

CuO: Bakır oksit nanoparçacık	μ : Dinamik viskozite[kg/ms]
ZnO: Çinko oksit nanoparçacık	k_e : Nanoakışkanın efektif ısı iletkenlik değeri [W/mK]
MgO: Magnezyum oksit nanoparçacık	k_b, k_t : Baz akışkanın ısı iletkenlik değeri [W/mK]
c_p : Özgül ısı [kJ/kgK]	k_{np} : Nanoparçacık ısı iletkenlik değeri [W/mK]
μ : Viskozite [kg/ms]	$c_{p,bf}$: Baz akışkanın özgül ısı [kJ/kgK]
φ_{np} : Nanoparçacık hacimsel oranı [%]	
c_{phn} : Nanoakışkan özgül ısı değeri [kJ/kgK]	
ρ_{hn} : Nanoakışkanın yoğunluk değeri [kg/m ³]	

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Wang, X., Xu, X. and Choi, S. U. S. (1999). Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 13(4), 474-480.
- [2] Han, D., He, W. and Asif, F. Z. (2017). Experimental study of heat transfer enhancement using nanofluid in double tube heat exchanger, Energy Procedia, 142, 2547-2553.
- [3] Ardekani, A. M., Kalantar, V. and Heyhat, M. M. (2019). Experimental study on heat transfer enhancement of nanofluid flow through helical tubes, Advanced Powder Technology, 30(9), 1815-1822.
- [4] Teng, T. P., Hsu, H. G., Mo, H. E. and Chen, C. C. (2010). Thermal efficiency of heat pipe with alumina nanofluid, Journal of Alloys and Compounds, 504(1), 380-384.
- [5] Anitha, S., Thomas, T., Parthiban, V. and Pichumani, M. (2019). What dominates heat transfer performance of hybrid nanofluid in single pass Shell and tube heat exchanger?, Advanced Powder Technology, 30(12), 3107-3117.
- [6] Sundar L. S., Singh M. K., Ferro M. C., and Sousaa A. C. M. (2017). Experimental investigation of the thermal transport properties of grapheneoxide/Co₃O₄ hybrid nanofluids, International Communications in Heat and Mass Transfer, 84, 1-10.
- [7] Murshed, S.M.S., Santos, F.J.V., Nieto de Castro, C.A. (2018). Morphology and thermophysical properties of non-aqueous titania nanofluids, Heat Mass Transfer 54, 2645–2650.
- [8] Turgut A., Tavman I., Chirtoc M., Schuchmann H.P., Sauter C. and Tavman S. (2009). Thermal conductivity and viscosity measurements of water-based TiO₂ nanofluids, International Journal of Thermophysics, 30(4), 1213-1226.
- [9] Ghasemi S. and Karimipour A. (2018). Experimental investigation of the effects of temperature and mass fraction on the dynamic viscosity of CuO-paraffin nanofluid, Applied Thermal Engineering, 128, 189-197.
- [10] Tiwari, A. K., Ghosh, P. and Sarkar, J. (2013). Performance comparison of the plate heat exchanger using different nanofluids, Experimental Thermal and Fluid Science, 49, 141-151.
- [11] Onyiriuka, E., Ighodaro, O., Adelaja, A., Ewim, D. and Bhattacharyya, S. (2019). A numerical investigation of the heat transfer characteristics of water-based mango bark nanofluid flowing in a double-pipe heat exchanger, Heliyon, 5(9), e02416.

- [12] Wang B.X., Zhou L.P. and Peng X.F. (2006). Surface and size effects on the specific heat capacity of nanoparticles, *International Journal of Thermophysics*, 27(1), 139-151.
- [13] Sundar, L. S., Sharma, K.V., Singh, M. K., Sousa, A. C. M. (2017). Hybrid nanofluids preparation, thermal properties, heat transfer and friction factor- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), 185-198.
- [14] Nguyen, C., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Mare, T. and Boucher, S. (2008). Viscosity data for Al₂O₃–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable?, *International Journal of Thermal Science*, 47, 103–111.
- [15] Pastoriza-Gallego, M. J., Casanova, C., Legido, J. L. and Pineiro, M. M. (2011). CuO in water nanofluid: Influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity, *Fluid Phase Equilibria*, 300, 188-196.
- [16] Suganthi K. S. and Rajan K. S. (2012). Temperature induced changes in ZnO – water nanofluid: zeta potential, size distribution and viscosity profiles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(25-26), 796-798.
- [17] Sahooli, M. and Sabbaghi, S. (2013). Investigation of thermal properties of CuO nanoparticles on the ethylene glycol–water mixture, *Materials Letters*, 93, 254-257.
- [18] Nadooshan, A. A. (2017). An experimental correlation approach for predicting thermal conductivity of water-EG based nanofluids of zinc oxide, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 87, 15-19.
- [19] Kim, H. D., Kim, J. and Kim, M. H. (2007). Experimental studies on CHF characteristics of nanofluids at pool boiling, *International Journal of Multiphase Flow*, 33(7), 691-706.
- [20] Esfe M. H., Afrand M., Karimipour A., Wei-MonYan, Nima, Sina. (2015). An experimental study on thermal conductivity of MgO nanoparticles suspended in a binary mixture of water and ethylene glycol, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 67, 173-175.
- [21] Esfe M. H., Saedodin S., Mahmoodi M. (2014). Experimental studies on the convective heat transfer performance and thermophysical properties of MgO–water nanofluid under turbulent flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 52, 68-78.
- [22] Kumar, P. M., Kumar, J., Tamilarasan, R., Sendhilnathan, S. and Suresh, S. (2015). Review on nanofluids theoretical thermal conductivity models, *Engineering Journal*, 19(1), 67–83.
- [23] Bellos, E. and Tzivanidis, C. (2017). Parametric investigation of nanofluids utilization in parabolic trough collectors, *Thermal Science and Engineering Progress*, 2, 71–79.
- [24] Gupta, M., Singh, V., Kumar, R. and Said, Z. (2017). A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 638–670.
- [25] Humnic, G. and Humnic, A. (2018). Hybrid nanofluids for heat transfer applications—A state-of the art review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 82–103.
- [26] Senthilkumar, A. P. (2012). Effectiveness study on Al₂O₃-TiO₂ Nanofluid Heat Exchanger, *International Journal of Engineering and Robot Technology*, 3(2), 8613.
- [27] Sözen, A., Variyenli, H. İ., Özdemir, M. B., Gürü, M. and Aytac, İ. (2016). Heat transfer enhancement using alumina and fly ash nanofluids in parallel and cross-flow concentric tube heat exchangers, *Journal of the Energy Institute*, 89(3), 414-424.

- [28] Ateş H., Bahçeci E. (2015). Nano malzemeler için üretim yöntemleri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji, 3(2):483-499.
- [29] Akilu, S., Baheta, A. T. and Sharma, K.V. (2017). Experimental measurements of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol-based hybrid nanofluid with TiO₂-CuO/C inclusions, Journal of Molecular Liquids, 246, 396-405.
- [30] Mousavi, S. M., Esmailzadeh F. and Wang, X. P. (2019). A detailed investigation on the thermo-physical and rheological behavior of MgO/TiO₂ aqueous dual hybrid nanofluid, Journal of Molecular Liquids, 282, 323-339.
- [31] Chandrasekar, M., Suresh, S., Chandra B. A. (2010). Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/water nanofluid, Experimental Thermal and Fluid Science, 34, 210-216.
- [32] Maxwell, J. C. (1881). A treatise on electricity and magnetism second ed., Clarendon Press, Oxford, UK.
- [33] Avsec, J., Oblak, M. (2007). The calculation of thermal conductivity, viscosity and thermodynamic properties for nanofluids on the basis of statistical nanomechanics, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 4331-4341.
- [34] Öcal, S. (2019). Isı transferi uygulamaları için çeşitli hibrit nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin incelenmesi, T.C. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- [35] Karakaş A. (2019). Çok bileşenli nanoakışkanların üretilmesi ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi, T.C. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Teknolojileri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- [36] Takabi, B., Salehi, S. (2014). Augmentation of the heat transfer performance of a sinusoidal corrugated enclosure by employing hybrid nanofluid, Advances in Mechanical Engineering, 2014,16.
- [37] Suresh, S., Venkataraj, K. P., Selvakumar P. and Chandrasekar M. (2011). Synthesis of Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 388, 1-3, 41-48.