



Dizel Bir Motorun Soğutma Sisteminde Nano-Akışkan Kullanımının Soğutmaya Etkisinin Teorik Analizi

Kemal Bilen^{1*}, Hakan Zafer Kızılkaya², Nazlı Hazal Kızılkaya³

ÖZ

İçten yanmalı motorların soğutulması, motor bloğuna zarar verecek seviyedeki yüksek sıcaklıklara ulaşılmasını önlemek için gereklidir. Bu nedenle literatürde, içten yanmalı motorların daha etkin soğutulabilmesine ilişkin çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır. İçten yanmalı motorun, aşırı doldurulması durumunda bu husus daha büyük bir önem kazanmaktadır. Bu motorlar, çoğunlukla sıvı akışkanlar ile soğutulurken bazıları hava ile soğutulur. Günlük yaşamda etilen glikolün donma sıcaklığının, suyun donma sıcaklığına göre nispeten düşük oluşu göz önünde bulundurularak motor soğutma sistemlerinde, sadece su yerine, su + etilen glikol karışımı kullanılır. Ayrıca, akışkanlara karıştırılan nano-parçacıkların genel olarak akışkanların termodinamik özelliklerini iyileştirdiği bilinir. Bu hususlar göz önüne alınarak bu teorik çalışmada, dizel bir motorun soğutma sisteminde sırasıyla; su, su + Al₂O₃, su + CuO, etilen glikol, su + etilen glikol, su + etilen glikol + Al₂O₃ veya su + etilen glikol + CuO akışkan veya nano-akışkanların kullanımının, motor bloğundan çekilen ısı miktarına etkisi incelenmiştir. Böylece bu çalışmada, su + etilen glikol karışımının kullanımı ile sadece suyun kullanımı veya çeşitli nano-akışkanların kullanımı, ısı bakımından mukayese edilmiştir. Bunun için öncelikle, karışımlardaki nano-parçacık hacimsel oranının; ilgili nano-akışkanın yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletim katsayısı gibi termodinamik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Daha sonra, bu yeni termodinamik özellikler kullanılarak akışkan veya nano-akışkanın, motor bloğundan çekilecek ısı miktarına etkisi incelenmiştir. Buna göre; incelenen akışkanlar arasında en yüksek yoğunluğa sahip akışkan %47.5 su + %47.5 etilen glikol + %5 CuO iken, en yüksek kütlele özgül ısıya su sahiptir. Çeşitli bağlantılar kullanılarak hesaplanan ısı iletim katsayıları arasındaki en yüksek değer, Wasp Modeli'ne göre %49.75 su + %49.75 etilen glikol + %0.5 CuO akışkanına aittir. Kütlele debisi en yüksek olan akışkan ise, doğal olarak yoğunluğunun yüksek oluşu nedeniyle %47.5 su + %47.5 etilen glikol + %5 CuO akışkanıdır. Bu verilere göre nano-akışkan kullanımı, yoğunluktaki artış nedeniyle motor bloğundan çekilen ısı miktarında yaklaşık %15 artış sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Dizel motorun soğutulması, su, etilen glikol, Al₂O₃, CuO, nano-akışkan, termodinamik özellik, ısı analiz.

Theoretical Analysis of the Effect of Nano-Fluid Usage on Cooling in the Cooling System of a Diesel Engine

ABSTRACT

Cooling of internal combustion engines are necessary to prevent reaching high temperatures that would damage the engine block. For this reason, studies on more efficient cooling of internal combustion engines are frequently encountered in the literature. This becomes even more important if the internal combustion engine is supercharged. These engines are mostly cooled by liquid fluids, while some are cooled by air. Considering this point, in this theoretical study, effect of using of water, water + Al₂O₃, water + CuO, ethylene glycol, water + ethylene glycol, water + ethylene glycol + Al₂O₃ or water + ethylene glycol + CuO in the cooling system of a diesel engine on the amount of heat removed is investigated, respectively. In daily life, considering that the freezing temperature of water is relatively higher than the freezing temperature of ethylene glycol, water + ethylene glycol mixture is used instead of single water in engine cooling systems. Considering this situation, in this study, usage of water-ethylene glycol mixture and usage of single water or usage of various nano-fluids are thermally compared. For this aim, primarily, the effect of nano-particle volumetric ratio in the mixtures on the thermophysical properties such as density, specific heat, and thermal conductivity of the related nano-fluid is investigated. Then, using these new thermophysical properties, the effect of fluid or nano-fluid on the amount of heat to be removed from the engine block is investigated. According to this; among the examined fluids, the fluid with the highest density is 47.5% water + 47.5% ethylene glycol + 5% CuO, while water has the highest specific heat. The highest value among the thermal conductivity values that are calculated using various relations belongs to 49.75% water + 49.75% ethylene glycol + 0.5% CuO fluid according to the Wasp Model. The fluid with the highest mass flow rate is 47.5% water + 47.5% ethylene glycol + 5% CuO fluid which has the highest density. According to these data, the usage of nano-fluids provided an increase nearly as 15% in the amount of heat removed from the engine block thanks to increasing in density and specific heat.

Keywords: Diesel engine cooling, water, ethylene glycol, Al₂O₃, CuO, nano-fluid, thermophysical property, thermal analysis.

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 05.05.2021

Kabul/Accepted : 08.12.2021

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara
kemal.bilen@ybu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1775-7977

² Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara
hzkizilkaya@gmail.com, ORCID:0000-0002-7842-241X

³ Gazi Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, nazlilkaya96@gmail.com, ORCID:0000-0003-3691-0076

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Cooling of internal combustion engines (ICEs) is necessary to prevent high temperatures that would damage the engine block. For this reason, studies on more effective cooling systems are frequently encountered in the literature. Considering this point, in this theoretical study, effect of usage of water, water + Al₂O₃, water + CuO, ethylene glycol, water + ethylene glycol, water + ethylene glycol + Al₂O₃ or water + ethylene glycol + CuO in a diesel engine cooling system on the removal of heat from engine block is investigated.

Method

In this theoretical study, effect of alternative fluids or nano-fluids formed with water, ethylene glycol, Al₂O₃, and CuO on the engine cooling system was carried out. As it is known, when gases are compressed, their temperature increases in proportion to the pressure. Because of this property of gases, air temperature can reach 600 °C up to 650 °C at the end of the compressing stroke in diesel engines [1, 2]. On the other hand in theory, the highest temperature in the cylinders at the end of the combustion stroke can reach up to 2507.35 °C, 3339.35 °C and 2779.55 °C in naturally aspirated engines, in supercharged engines without intercooling, and in supercharged engines with intercooling, respectively, as explained in Table 2. Therefore, an effective cooling system is needed for all ICEs.

In this theoretical study, following assumptions are made in thermodynamic analysis: Steady-state conditions are assumed. Fluids or nano-fluids used in the cooling system are at 1 atm. Thermophysical properties of the fluids and nano-fluids are taken at 1 atm. Thermophysical properties of the fluids are calculated at mean temperature of the fluids and considered as constant. Pressure drop in the flow direction is neglected. Changing in kinetic and potential energy in the flow direction are neglected.

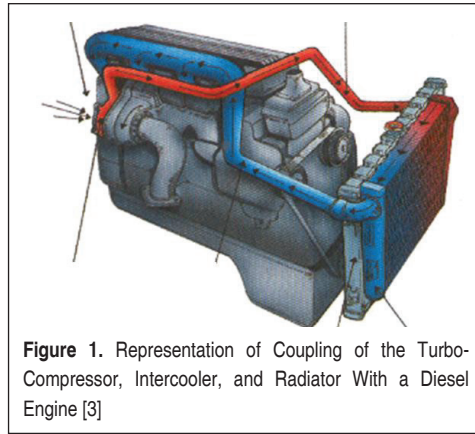


Figure 1. Representation of Coupling of the Turbo-Compressor, Intercooler, and Radiator With a Diesel Engine [3]

Thermophysical properties such as density, specific heat, and thermal conductivity of water, ethylene glycol, Al₂O₃, and CuO are taken from literature [4-11]. Hence, thermophysical properties of the fluids mixture or nano-fluids used in this study are calculated considering the fluids mixture or nano-fluid composition by using these properties.

Findings and Discussion

Firstly, thermophysical properties of fluids mixture or nano-fluids are determined using some equations.

Table 5. Amount of Heat Removed From Engine Block by Each Fluid Or Nano-Fluid For The Same Temperature Difference

Number of fluid or nano-fluid	Mass flow rate [kg/s]	Specific heat [J/(kg·K)]	Temperature difference [°C]	The amount of heat removed [kW]	Change in heat transfer amount according to the reference fluid $[(q_1 - q_{26})/q_{26}] \cdot 100$ [%]
1	0.96477	4206.78000	20	81.17123	16.82018
-	-	-	-	-	-
51	1.03259	2708.52537	20	69.49111	0.01037



Then, amounts of heat removed by fluids mixture or nano-fluids from engine block in unit time for the same temperature difference were calculated. The results are given in Table 5.

In result, the highest density is observed for 51st nano-fluid, while the lowest one is observed for 1st fluid. Then, the highest specific heat is observed for 51st nano-fluid, while the lowest one is 1st fluid. By using Equation 3, the highest thermal conductivity is observed for 1st fluid, while the lowest one is 9th nano-fluid. Then, according to the Equation 4, the highest thermal conductivity is observed for 42nd nano-fluid and the lowest one is observed for 31st nano-fluid.

On the other hand, the highest amount of heat removed in unit time occurs for 1st fluid, while the lowest one occurs for 51th nano-fluid. This is the most important indicator of performance of the engine cooling system. However, due to the freezing temperature, the comparison should be done between the mixture of water + ethylene glycol and nano-fluids obtained using water + ethylene glycol mixture. In this case, the highest heat transfer occurs for 51th fluid. On the other hand, it is observed that specific heat does not constantly increase with the increase of nano-particle concentration especially after a specified volumetric concentration.

Also, cooling of ICEs directly affects performance of the ICEs. Hence, performance analysis of the cooled ICEs is important for the future studies. Finally, it is hoped that this study will be useful for researchers who will study in the cooling of ICEs.



1. GİRİŞ

Ulaşım ve ulaştırma araçları çeşitli motorlar tarafından hareket ettirilmektedir. Fosil yakıtlarla çalışan motorlarda, yanmanın gerçekleşmesinden dolayı sürekliliğin sağlanabilmesi için soğutma gereklidir. Gerek malzemelerin ömrü açısından gerekse ısı verimin artırılabilmesi için hareket başladığı andan itibaren çeşitli tekniklerle soğutmalar tasarlanmıştır.

Bu çalışmada, turbo-kompresörlü aşırı doldurmalı dizel bir motorun çalışma prensibi ve soğutma sistemi incelenmiş daha sonra soğutma sisteminde mevcut durumda kullanılan su + etilen glikol karışımına alternatif nano-akışkanlar kullanılarak bir ısı analiz gerçekleştirilmiştir.

Yanmanın motor içerisinde olduğu motor çeşitlerine içten yanmalı motorlar denir. Motorlar, yakıt çeşidine veya ateşleme şekline göre de sınıflandırılır. Yanmanın, sıkıştırma ile gerçekleştiği motorlara dizel motorlar denir. Dizel motorlarda yakıt olarak, dizel yakıtı veya motorin olarak bilinen $C_{14}H_{30}$ kullanılır. Bu motorlarda hava, silindirler içerisinde sıkıştırılarak silindir içerisindeki sıcaklık, tutuşma sıcaklığına kadar yükseltilir ve yüksek sıcaklıktaki hava içerisine yakıt püskürtülerek yanma elde edilir. İçten yanmalı motorlardaki bu yanma işleminden dolayı yüksek miktarda soğutma ihtiyacı duyulur.

Literatürde konu ile ilgili yapılmış pek çok çalışma yapılmıştır mevcuttur. Geçmişten günümüze bakıldığında; 1947 yılında Ginnings vd. [5] Al_2O_3 nano-parçacığının entalpi, entropi, özgül ısı gibi termodinamik özelliklerini $0\text{ }^{\circ}C$ ila $900\text{ }^{\circ}C$ aralığında deneysel olarak raporlamış, 1984 yılında Bohne vd. [6] etilen glikol-su karışımının termodinamik özelliklerini deneysel olarak incelemiş, Pak ve Cho [7] ise 1997 yılında Al_2O_3 nano-parçacıklarının termodinamik özelliklerini yine deneysel olarak incelemiş ve hidrodinamik denklemleri kullanarak ısı geçişine etkisini yorumlamıştır. 2008 yılında Vajjha vd. [8] Al_2O_3 nano-parçacığının özgül ısı ve yoğunluk değerlerini çeşitli şartlar altında incelemiştir. 2014 yılındaysa Barbes vd. [9], Vajjha vd. [8] çalışmasına benzer şekilde bu kez CuO nano-parçacığı için aynı özellikleri incelemiştir. Usri vd. [10] ise 2015 yılında sadece Al_2O_3 nano-parçacığının Etilen Glikol-Su karışımındaki ısı etkisini incelemiş, yine 2015 yılında Senthilraja vd. [11] Al_2O_3 ve CuO nano-parçacıklarını su ile karıştırıp bunların termodinamik özelliklerini karşılaştırmış, Dawood vd. [12] ise yine 2015 yılında nano-akışkan kullanımının laminar ve türbülanslı akış şartlarında ısı geçişi ve sürtünme katsayısı (f) üzerindeki numarik etkilerini araştırmıştır. Bilen vd. [13], 2019 yılında nano-akışkanlardan Al_2O_3 ve CNTs parçacıklarının R1234yf soğutucu akışkanına termodinamik özellikler bakımından etkisini araştırmış, Karakaya vd. [14] ise yine 2019 yılında nano mineralojik akışkanların termodinamik özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır.

Yukarıda özetlendiği üzere, literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak bu teorik çalışmada; etilen glikol-su karışımı ile Al_2O_3 ve CuO nano-parçacıklarından oluşan nano-akışkanların motor soğutma sistemi performansına etkisi incelenmiştir. Etilen



glikol-su karışımındaki her bir karışanın hacimsel oranı, günlük yaşam ile uyumlu olacak şekilde yani eşit hacimsel oranlarda seçilerek, motor soğutma sisteminden çekilen ısı miktarı bakımından karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca, ısı analizinde kullanılan ortalama akışkan sıcaklığı, günlük yaşama uygun olacak şekilde 90 °C, akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark ise 20 °C olarak seçilmiştir.

2. İNCELENEN İÇTEN YANMALI MOTORUN TEKNİK ÖZELİKLERİ

Bu çalışmada, Tablo 1’de teknik özellikleri verilen 6.0 L hacmindeki Ford Cargo TCI motoru esas alınmıştır. Otosan A.Ş. tarafından üretilen bu motor, turbo-kompresörlü aşırı doldurmalı dizel bir motordur. Sıkıştırma ateşlemeli olan bu motorda, piston tarafından sıkıştırılan havanın içerisine, piston üst ölü noktada iken dizel yakıtı yüksek basınçta püskürtülerek yanma başlatılır. Böylece, silindir içerisindeki gazın genişmesiyle piston alt ölü noktaya doğru ilerler ve pistonun aşağı yönlü bu hareketi sonucunda biyel vasıtasıyla krank miline mekanik güç aktarılacak aracın hareketi için gerekli olan moment elde edilmiş olur. Bu çalışmada esas alınan Ford Cargo 6.0 L TCI motoruna ait teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

İdeal gaz kanununa göre, gazlar sıkıştırıldığında basınçla orantılı olarak sıcaklıkları da artar. Gazların bu özelliklerinden dolayı, yeterince sıkıştırılmış yani sıcaklığı yakıtın tutuşma sıcaklığına ulaşmış hava içerisine püskürtülen yakıt, kendiliğinden tutuşur. Tabii emmeli dizel motorlarda sıkıştırma periyodu sonunda hava sıcaklığı, 600 °C ila 650 °C değerlerine ulaşabilir. Bununla beraber, bu teorik çalışmada incelenen aşırı

Tablo 1. Aşırı doldurmalı, Ara Soğutmalı ve Direkt Püskürtmeli Ford Cargo 6.0 L TCI Motorunun Teknik Özellikleri [1]

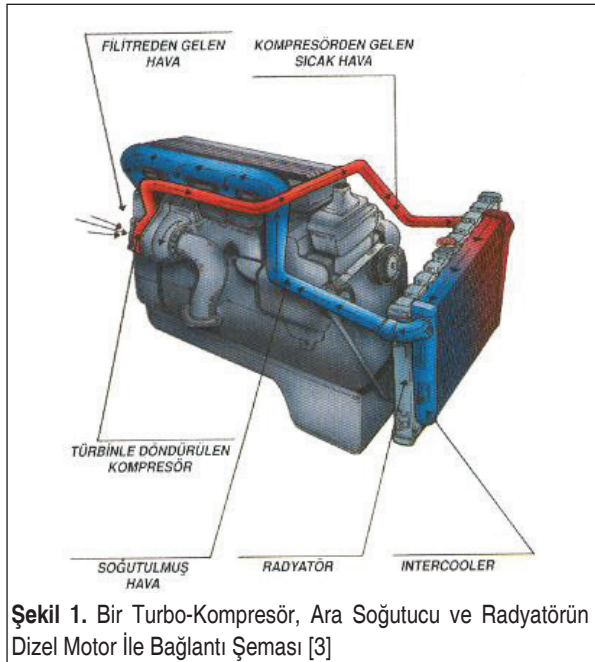
Özellik	Değer
Strok sayısı [adet]	4
Silindir sayısı [adet]	6
Silindir çapı [mm]	104.77
Piston stroku [mm]	114.9
Sıkıştırma oranı [-]	16.5/1
Maksimum motor gücü [kW]	136 (2400 dev/dak’da)
Maksimum devir sayısı [dev/dak]	2750 - 2780
Rölanti devri [dev/dak]	665 - 685
Motor hacmi [L]	5.947
Püskürtme avansı [°KMA]	20
Püskürtme sırası [-]	1-5-3-6-2-4
Motorun kütlesi [kg]	500

doldurmalı ve ara soğutmalı motorda yanma işlemi sonunda silindirler içerisindeki sıcaklıklar ise Tablo 2’de gösterilmiştir.

Bir turbo-kompresör ve ara soğutucunun motor ile bağlantı şeması Şekil 1’de verilmiştir. Şekil 1’de şematik olarak gösterildiği gibi turbo-kompresörlü aşırı doldurmalı motorlar, motordan elde edilecek gücün artırılması amacıyla geliştirilmiştir. Bu motorlar, motordan elde edilecek gücün artırılmasını şu yöntemle sağlarlar: Egzoz gazları türbin kanatçıklarını döndürür, ardından birbirlerine aynı milde bağlı olan (akuple) türbinden kompresöre güç aktarılır ve böylece motor silindirlerine daha yüksek basınçlı ve daha yoğun hava alınır. Bu, motor silindirlerine daha fazla hava alınmasını sağlar. Bu motorlarda, kompresör kullanılarak silindirlere daha yüksek basınçlı ve daha yüksek sıcaklığa sahip hava emileceğinden, Tablo 2’de de görüldüğü gibi yanma esnasında motorda yüksek sıcaklık problemi ortaya çıkmaktadır.

Tablo 2. Karma Çevrime Göre Çalışan Bir Dizel Motorun; Tabii Emmeli, Ara Soğutmasız Aşırı Doldurmalı ve Ara Soğutmalı Aşırı Doldurmalı Çalışma Şekillerinde, Karma Çevrimin Önemli Noktalarındaki Sıcaklık Değerleri [1]

Motorun çalışma şekli	T_1 [K]	T_2 [K]	T_3 [K]	T_4 [K]	T_5 [K]
Tabii emmeli	298	914.6	1463.4	2780.5	1171.2
Aşırı doldurmalı fakat ara soğutmasız	387.2	1188.3	1901.3	3612.5	1521.7
Aşırı doldurmalı ve ara soğutmalı	327.2	1004.2	1606.7	3052.7	1285.9



Motorlarda ortaya çıkan bu yüksek sıcaklık probleminin önüne geçmek için sisteme bir ara soğutucu (intercooler) ilave edilir. Böylece, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık-taki hava, motor silindirlerine girmeden önce bu ara soğutucuda atmosferik hava ile soğutulur. Bu motorlardaki genel sıcaklık seviyesi, tabii emişli motorlara göre daha yüksektir ve bu motorların soğutma sisteminin, tabii emişli motorlara göre daha etkin bir soğutma yapması gerekir. Bu nedenle bu çalışmada; turbo-kompresörlü, aşırı doldurmalı ve ara soğutmalı dizel bir motor seçilmiş ve bu motorun soğutma sisteminde, sadece su kullanılması yerine su ile kimyasal formülü $C_2H_4(OH)_2$ olan etilen glikolün belirli oranlarda karışımının ve bazı nano-parçacıkların kullanılması ısıl bakımdan analiz edilmiştir.

3. TEORİK İNCELEME

Motor soğutma sisteminin ısıl analizi için Tablo 3'te gösterilen değerler kullanılmıştır. Hesaplamalar için gerekli olan su ve etilen glikolün, 1 atm basıncındaki yoğunluk, kütleli özgül ısı ve ısı iletim katsayısı, 4 numaralı kaynaktan alınmıştır. Bu teorik çalışmadaki ısıl hesaplamaları yapabilmek için şu kabuller yapılmıştır:

- Sürekli rejim şartları geçerlidir.
- Soğutma sisteminde kullanılan akışkanların 1 atm basıncına sahip oldukları kabul edilmiş ve akışkanların termodinamik özellikleri bu basınç dikkate alınarak tespit edilmiştir.
- Akışkanların termodinamik özellikleri, ilgili akışkanın aritmetik ortalama sıcaklığında hesaplanmış ve bu termodinamik özellikler, akış boyunca sabit kabul edilmiştir.
- Akış doğrultusundaki basınç düşümü ihmal edilmiştir.
- Akış doğrultusundaki kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

Soğutma akışkanı için Tablo 3'te verilen giriş-çıkış sıcaklık değerleri kullanılarak, Tablo 4'te yer alan bütün akışkanların; yoğunluk, kütleli özgül ısı ve ısı iletim katsayısı gibi termodinamik özellikleri bulunmuştur. Alternatif akışkanlar oluşturulurken, bileşenlerin karışımındaki hacimsel oranları esas alınmıştır.

Tablo 4'teki değerlerin bulunmasında Denklem 1 ile Denklem 6 kullanılmıştır. Buna göre; karışım veya nano-akışkanın yoğunluğu, teoriden hareketle bulunan Denklem 1 [7] kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 3. Motor Soğutma Sistemindeki Isıl Analiz İçin Kullanılan Değerler

Parametre	Kabul edilen değer
Sadece su kullanılması durumunda hacimsel debi [L/s]	1
Sadece su kullanılması durumunda kütleli debi [kg/s]	0.965
Soğutma akışkanının giriş sıcaklığı [°C]	80
Soğutma akışkanının çıkış sıcaklığı [°C]	100



Tablo 4. Motor Soğutma Sisteminde Kullanılan Akışkan Veya Nano-Akışkanlar ve Bu Akışkanların 90 °C'daki (363.15 K'deki) Termofiziksel Özellikleri

No	Akışkanın bileşimi	Yoğunluk [kg/m ³]	Kütleesel özgül ısı [J/(kg.K)]	Isı iletim katsayısı [W/(m.K)]			
				Denklemler 3'e göre	Denklemler 4'e göre	Denklemler 5'e göre	Denklemler 6'ya göre
1	%100 su	964.76672	4206.78000	0.67589	0.67589	0.67589	-
2	%99.5 su + %0.5 Al ₂ O ₃	979.39289	4138.74130	0.29199	0.68558	0.68924	-
3	%99 su + %1 Al ₂ O ₃	994.01905	4072.70486	0.29214	0.69536	0.70259	-
4	%98.5 su + %1.5 Al ₂ O ₃	1008.64522	4008.58359	0.29229	0.70523	0.71594	-
5	%98 su + %2 Al ₂ O ₃	1023.27139	3946.29535	0.29244	0.71520	0.72929	-
6	%97.5 su + %2.5 Al ₂ O ₃	1037.89755	3885.76267	0.29259	0.72527	0.74263	-
7	%97 su + %3 Al ₂ O ₃	1052.52372	3826.91234	0.29274	0.73544	0.75598	-
8	%96.5 su + %3.5 Al ₂ O ₃	1067.14988	3769.67519	0.29289	0.74570	0.76933	-
9	%96 su + %4 Al ₂ O ₃	1081.77605	3713.98580	0.29303	0.75607	0.78268	-
10	%95.5 su + %4.5 Al ₂ O ₃	1096.40222	3659.78221	0.29318	0.76654	0.79603	-
11	%95 su + %5 Al ₂ O ₃	1111.02838	3607.00575	0.29333	0.77712	0.80938	-
12	%99.5 su + %0.5 CuO	991.49289	4090.47366	0.29199	0.68511	0.68924	-



13	%99 su + %1 CuO	1018.21905	3980.27293	0.29214	0.69441	0.70259	-
14	%98.5 su + %1.5 CuO	1044.94522	3875.70932	0.29229	0.70380	0.71594	-
15	%98 su + %2 CuO	1071.67139	3776.36108	0.29244	0.71327	0.72929	-
16	%97.5 su + %2.5 CuO	1098.39755	3681.84753	0.29259	0.72283	0.74263	-
17	%97 su + %3 CuO	1125.12372	3591.82411	0.29274	0.73248	0.75598	-
18	%96.5 su + %3.5 CuO	1151.84988	3505.97829	0.29289	0.74222	0.76933	-
19	%96 su + %4 CuO	1178.57605	3424.02587	0.29303	0.75205	0.78268	-
20	%95.5 su + %4.5 CuO	1205.30222	3345.70784	0.29318	0.76198	0.79603	-
21	%95 su + %5 CuO	1232.02838	3270.78769	0.29333	0.77199	0.80938	-
22	%90 su + %10 etilen glikol	975.46010	4040.85025	0.29476	0.64638	-	0.61403
23	%80 su + %20 etilen glikol	986.15348	3878.51902	0.29745	0.61772	-	0.55915
24	%70 su + %30 etilen glikol	996.84685	3719.67051	0.29995	0.58988	-	0.51035
25	%60 su + %40 etilen glikol	1007.54023	3564.19383	0.30228	0.56280	-	0.46669
26	%50 su + %50 etilen glikol	1018.23361	3411.98275	0.30447	0.53648	-	0.42725
27	%40 su + %60 etilen glikol	1028.92699	3262.93545	0.30653	0.51086	-	0.39113
28	%30 su + %70 etilen glikol	1039.62037	3116.95431	0.30847	0.48593	-	0.35739



29	%20 su + %80 etilen glikol	1050.31374	2973.94567	0.31032	0.46167	-	0.32513
30	%10 su + %90 etilen glikol	1061.00712	2833.81967	0.31208	0.43803	-	0.29341
31	%100 etilen glikol	1071.70050	2696.49000	0.31376	0.41500	-	0.26132
32	%49.75 su + %49.75 etilen glikol + %0.5 Al ₂ O ₃	1032.59244	3362.42030	0.40754	1.00814	0.42320	-
33	%49.5 su + %49.5 etilen glikol + %1 Al ₂ O ₃	1046.95127	3314.21733	0.40775	1.00085	0.43139	-
34	%49.25 su + %49.25 etilen glikol + %1.5 Al ₂ O ₃	1061.31011	3267.31868	0.40796	0.99362	0.43959	-
35	%49 su + %49 etilen glikol + %2 Al ₂ O ₃	1075.66894	3221.67210	0.40817	0.98647	0.44779	-
36	%48.75 su + %48.75 etilen glikol + %2.5 Al ₂ O ₃	1090.02777	3177.22811	0.40838	0.97938	0.45598	-
37	%48.5 su + %48.5 etilen glikol + %3 Al ₂ O ₃	1104.38660	3133.93982	0.40858	0.97236	0.46418	-
38	%48.25 su + %48.25 etilen glikol + %3.5 Al ₂ O ₃	1118.74543	3091.76271	0.40879	0.96540	0.47237	-
39	%48 su + %48 etilen glikol + %4 Al ₂ O ₃	1133.10427	3050.65456	0.40900	0.95851	0.48057	-
40	%47.75 su + %47.75 etilen glikol + %4.5 Al ₂ O ₃	1147.46310	3010.57522	0.40920	0.95168	0.48877	-
41	%47.5 su + %47.5 etilen glikol + %5 Al ₂ O ₃	1161.82193	2971.48655	0.40941	0.94491	0.49696	-
42	%49.75 su + %49.75 etilen glikol + %0.5 CuO	1044.69244	3325.60225	0.40754	1.57501	0.42320	-



43	%49.5 su + %49.5 etilen glikol + %1 CuO	1071.15127	3243.48917	0.40775	1.56380	0.43139	-
44	%49.25 su + %49.25 etilen glikol + %1.5 CuO	1097.61011	3165.33490	0.40796	1.55270	0.43959	-
45	%49 su + %49 etilen glikol + %2 CuO	1124.06894	3090.85990	0.40817	1.54169	0.44779	-
46	%48.75 su + %48.75 etilen glikol + %2.5 CuO	1150.52777	3019.81031	0.40838	1.53079	0.45598	-
47	%48.5 su + %48.5 etilen glikol + %3 CuO	1176.98660	2951.95514	0.40858	1.51999	0.46418	-
48	%48.25 su + %48.25 etilen glikol + %3.5 CuO	1203.44543	2887.08368	0.40879	1.50929	0.47237	-
49	%48 su + %48 etilen glikol + %4 CuO	1229.90427	2825.00337	0.40900	1.49869	0.48057	-
50	%47.75 su + %47.75 etilen glikol + %4.5 CuO	1256.36310	2765.53786	0.40920	1.48818	0.48877	-
51	%47.5 su + %47.5 etilen glikol + %5 CuO	1282.82193	2708.52537	0.40941	1.47776	0.49696	-



$$\rho_{na} = (1 - \varphi)\rho_a + \varphi\rho_p \quad (1)$$

Burada; ρ_{na} [kg/m^3] karışımın veya nano-akışkanın yoğunluğunu, φ [-] nano-parçacığın hacimsel oranını (su + etilen glikol karışımındaki etilen glikolün hacimsel oranı ise Şekil 3, 5, 7, 9, 11, 13 ve 15'te olduğu gibi ϕ [-] ile gösterilmiştir), ρ_a [kg/m^3] suyun veya etilen glikol ile su karışımının yoğunluğunu, ρ_p [kg/m^3] ise nano-parçacığın yoğunluğunu göstermektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi termodinamik özelliklere ilişkin tüm hesaplamalarda, akışkanların soğutma sistemine giriş-çıkış sıcaklıklarının aritmetik ortalaması olan 90 °C yani 363.15 K esas alınmıştır.

Karışımın veya nano-akışkanın kütleli özgül ısı, yine teoriden elde edilen ve yoğunluğun belirlenmesinde kullanılan Denklem 1'e benzer formda olan Denklem 2 [10] kullanılarak elde edilmiştir.

$$(\rho c_p)_{na} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_a + \varphi(\rho c_p)_p \quad (2)$$

Benzer şekilde burada; $(c_p)_{na}$ [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] karışımın (nano-akışkanın) kütleli özgül ısını; φ [-] yine nano-parçacığın hacimsel oranını, $(c_p)_a$ [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] suyun veya su ile etilen glikol karışımının kütleli özgül ısını, $(c_p)_p$ [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] ise nano-parçacığın kütleli özgül ısını göstermektedir. Bu çalışmadaki tüm nano-akışkanların ısı iletim katsayısı ise, kaynaklarda [10, 13]; aşağıdaki kabullerle kullanılabilceği belirtilen Denklem 3 ile ifade edilen korelasyon yardımıyla hesaplanmıştır.

- Al_2O_3 nano-parçacıklarının %0.5 ila %2 hacimsel oranları arasında olması,
- Karışımın, 30 °C ila 70 °C sıcaklık aralığında olması,
- Su + etilen glikol karışımında, temel akışkan olan suyun 0.4 ila 0.6 hacimsel oranları arasında olması.

Kaynaklardan [11, 15] elde edilen bilgilere göre, karışımların ısı iletim katsayısı, teorik olarak bulunabilen bir özellik değildir. Karışımların ısı iletim katsayısı, yarı-deneysel olarak hesaplanabilir. Bu amaçla, temel teorik ilkelere bağlı kalınması şartıyla deneysel verilerin kullanılmasıyla elde edilen çeşitli korelasyonlar kullanılabilir. Bahsedilen çalışmalar yardımıyla elde edilen denklemler, ısı iletim katsayısı hakkında bilgi vermektedir. Deneysel çalışmalarla elde edilen verilerden oluşturulan korelasyonlar kullanılarak bulunan denklemlerle ve ilgili korelasyonun kullanılabilmesi için gerekli olan şartların sağlanmasıyla, gerçeğe yakın değerler bulunması mümkün olmaktadır. Isı iletim katsayısı, daha önce de belirtildiği üzere yarı-deneysel yöntemlerle bulunan bir özellik olup literatürde bulunan pek çok korelasyonun kendine özgü şartları sağlandığı takdirde teorik olarak da hesaplanabilmektedir.

Bu husus göz önüne alınarak bu teorik çalışmadaki tüm nano-akışkanların ısı iletim katsayısının bulunmasında; hem Denklem 3 [10] kullanılmış, hem de Denklem 4 ile ifade edilen ve Wasp modeli [11] olarak bilinen model kullanılmıştır. Bu modellere ilave olarak Denklem 5 ile ifade edilen Timofeeva modeli [15] ve Denklem 6 ile ifade edilen Filippov modeli [16] kullanılmıştır. Bununla birlikte, Wasp modeli, bütün nano-akışkanlar için kullanılabilirken, Denklem 3 ile ifade edilen korelasyon sadece Al_2O_3 katkılı su + etilen glikol için kullanılabilir. Ayrıca, Filippov modeli etilen glikol ve su karışımı için geçerliken Timofeeva modeli ise 50:50 su + etilen glikol karışımlarında, nano-parçacığın %5 derişikliğine kadar kullanılabilir.

Denklem 3'te [10] yer alan φ [%] nano-parçacığın hacimsel oranını, T °C biriminde akışkan ortalama sıcaklığını ve BR (Base Ratio) parametresi ise, nano-akışkan oluşturulurken su + etilen glikol karışımındaki suyun yani temel akışkanın hacimsel yüzdesini ifade etmektedir. Bu teorik çalışmada, akışkan ortalama sıcaklığı 90 °C olarak kabul edilmiş olup su ile etilen glikol hep eşit hacimlerde karıştırıldığından BR için 0.5 değeri esas alınmıştır.

$$k_{na} = 0.634(1 + \varphi)^{0.1045} \left(\frac{T}{70}\right)^{0.1094} (1 + BR)^{-1.1590} \quad (3)$$

$$k_{na} = \frac{k_p + 2k_a + 2\varphi(k_p - k_a)}{k_p + 2k_a - \varphi(k_p - k_a)} k_a \quad (4)$$

$$\frac{k_{na}}{k_a} = 1 + C_k \varphi \quad (5)$$

$$k_k = (1 - \varphi)k_{su} + \varphi k_{EG} - k^*(k_{su} - k_{EG})(1 - \varphi)\varphi \quad (6)$$

$$k^* = 0.6635 - 0.3698\varphi - 8.85 \cdot 10^{-4}T \quad (7)$$

Denklem 5'te bulunan C_k değeri 3.95 olarak tanımlanmıştır [15]. Ayrıca, Denklem 6'da yer alan k^* değeri, 7 numaralı denklem yardımıyla bulunabilir. Bazı kaynaklarda [5-14], nano-parçacıkların termofiziksel özellikleri için sıcaklığa bağlı olarak farklı sayısal değerler önerilmektedir. Bununla birlikte bu çalışmada, Denklem 4 ile ifade edilen Wasp modeli kullanılarak yapılan hesaplamalarda ve Denklem 6 ile ifade edilen Filippov modelinde; Al_2O_3 için $k_p=40$ [W/(m.K)], CuO için ise $k_p=20$ [W/(m.K)] değerleri [13] kullanılmıştır. Yine, Wasp modeli kullanılarak yapılan hesaplamalarda su için $k_a = 0.67589$ [W/(m.K)], etilen glikol için $k_a=0.261315$ [W/(m.K)] değerleri [7], buna karşılık eşit hacimsel orana sahip su + etilen glikol karışımı için ise $k_a=0.415$ [W/(m.K)] değeri [9] esas alınmıştır.



Motor bloğundan sabit basınçta çekilen ısı miktarı ise, yapılan kabuller göz önüne alınarak Termodinamiğin Birinci Yasasından hareketle elde edilen Denklem 8 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$q = \dot{m}c_p\Delta T \quad (8)$$

4. TEORİK İNCELEME SONUÇLARI

Termofiziksel özellikleri tespit edilen her bir akışkan veya nano-akışkanın, aynı sıcaklık farkı için motor bloğundan birim zamanda çekeceği ısı miktarı hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 5'te gösterilmiştir. Tablo 4 ve Tablo 5'deki sonuçlar kullanılarak Şekil 2 ile Şekil 15'teki grafikler çizilmiştir.

Tablo 5. Akışkanların, Aynı Sıcaklık Farkı için Motor Bloğundan Birim Zamanda Çekeceği Isı Miktarı

No	Kütleli debi [kg/s]	Kütleli özgül ısı [J/(kg·K)]	Sıcaklık farkı [°C]	Çekilen ısı miktarı [kW]	Referans akışkana göre çekilen ısı miktarındaki değişim $[(q_i - q_{26})/q_{26}] \cdot 100$ [%]
1	0.96477	4206.78000	90	81.17123	16.82018
2	0.97939	4138.74130	90	81.06908	16.67316
3	0.99402	4072.70486	90	80.96692	16.52615
4	1.00865	4008.58359	90	80.86477	16.37913
5	1.02327	3946.29535	90	80.76262	16.23212
6	1.03790	3885.76267	90	80.66047	16.08511
7	1.05252	3826.91234	90	80.55832	15.93809
8	1.06715	3769.67519	90	80.45617	15.79108
9	1.08178	3713.98580	90	80.35402	15.64406
10	1.09640	3659.78221	90	80.25187	15.49705
11	1.11103	3607.00575	90	80.14972	15.35004
12	0.99149	4090.47366	90	81.11351	16.73711
13	1.01822	3980.27293	90	81.05579	16.65405
14	1.04495	3875.70932	90	80.99808	16.57098
15	1.07167	3776.36108	90	80.94036	16.48792

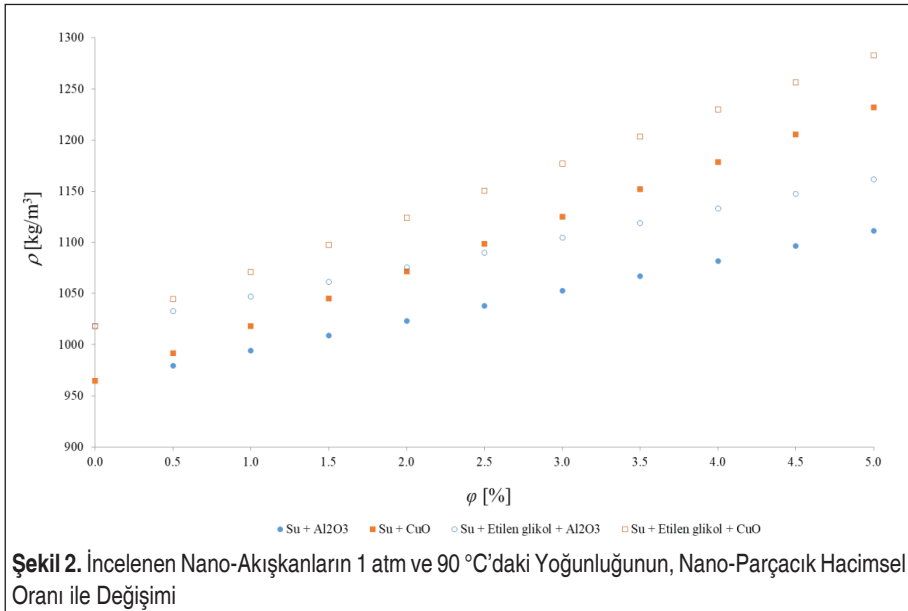


16	1.09840	3681.84753	90	80.88265	16.40486
17	1.12512	3591.82411	90	80.82493	16.32179
18	1.15185	3505.97829	90	80.76721	16.23873
19	1.17858	3424.02587	90	80.70950	16.15566
20	0.97546	3345.70784	90	80.65178	16.07260
21	0.98615	3270.78769	90	80.59407	15.98954
22	0.99685	4040.85025	90	78.83376	13.45614
23	1.00754	3878.51902	90	76.49630	10.09211
24	1.01823	3719.67051	90	74.15884	6.72807
25	1.02893	3564.19383	90	71.82137	3.36404
26	1.03962	3411.98275	90	69.48391	0.00000
27	1.05031	3262.93545	90	67.14645	-3.36404
28	1.06101	3116.95431	90	64.80898	-6.72807
29	1.07170	2973.94567	90	62.47152	-10.09211
30	1.03259	2833.81967	90	60.13406	-13.45614
31	1.04695	2696.49000	90	57.79659	-16.82018
32	1.06131	3362.42030	90	69.44020	-0.06291
33	1.07567	3314.21733	90	69.39648	-0.12583
34	1.09003	3267.31868	90	69.35277	-0.18874
35	1.10439	3221.67210	90	69.30905	-0.25165
36	1.11875	3177.22811	90	69.26534	-0.31457
37	1.13310	3133.93982	90	69.22162	-0.37748
38	1.14746	3091.76271	90	69.17791	-0.44039
39	1.16182	3050.65456	90	69.13419	-0.50331
40	1.04469	3010.57522	90	69.09048	-0.56622
41	1.07115	2971.48655	90	69.04676	-0.62913

42	1.09761	3325.60225	90	69.48463	0.00104
43	1.12407	3243.48917	90	69.48535	0.00207
44	1.15053	3165.33490	90	69.48607	0.00311
45	1.17699	3090.85990	90	69.48679	0.00415
46	1.20345	3019.81031	90	69.48751	0.00518
47	1.22990	2951.95514	90	69.48823	0.00622
48	1.25636	2887.08368	90	69.48895	0.00726
49	1.28282	2825.00337	90	69.48967	0.00829
50	1.07170	2765.53786	90	69.49039	0.00933
51	1.03259	2708.52537	90	69.49111	0.01037

Bu çalışmada incelenen farklı nano-akışkanların 1 atm ve 90 °C'deki (363.15 K'deki) yoğunluğunun nano-parçacık hacimsel oranı ile değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir.

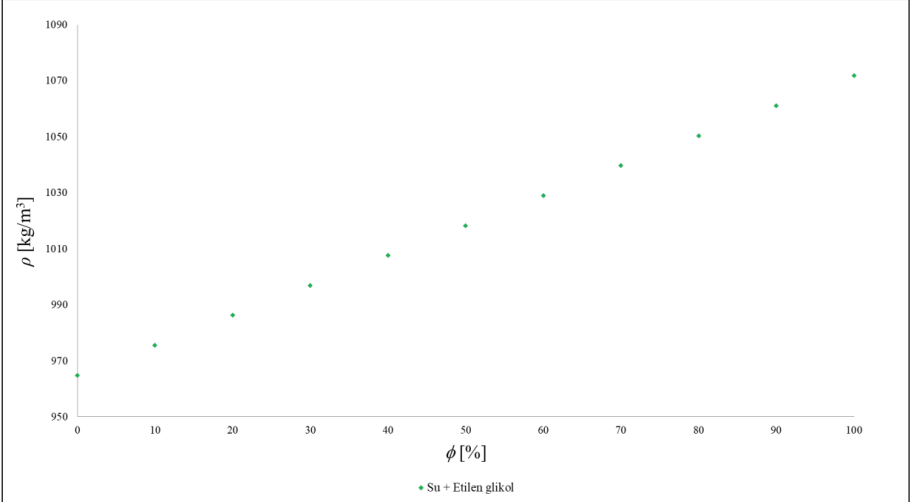
Şekil 2'deki veriler incelendiğinde; incelenen farklı nano-akışkanlar arasında en yüksek yoğunluğa 51 numaralı akışkanın yani %47.5 su + %47.5 etilen glikol + %5 CuO nano-akışkanının sahip olduğu, buna karşılık en düşük yoğunluğa ise 1 numaralı akış-



kanın yani suyun sahip olduğu görülmektedir. Böylece, 51 numaralı nano-akışkanın bu yüksek yoğunluğu, soğutma akışkanının aynı hacimsel debide kullanılması durumunda kütleli debi üzerinde büyük bir etkiye sahip olacaktır.

Su + etilen glikol karışımının yine 1 atm ve 90 °C'daki yoğunluğunun etilen glikol hacimsel oranı ile değişimi ise Şekil 3'te gösterilmiştir.

Şekil 3'teki veriler incelendiğinde; analiz edilen farklı akışkanlar arasında en yüksek yoğunluğa 31 numaralı akışkanın yani etilen glikolün sahip olduğu buna karşılık en

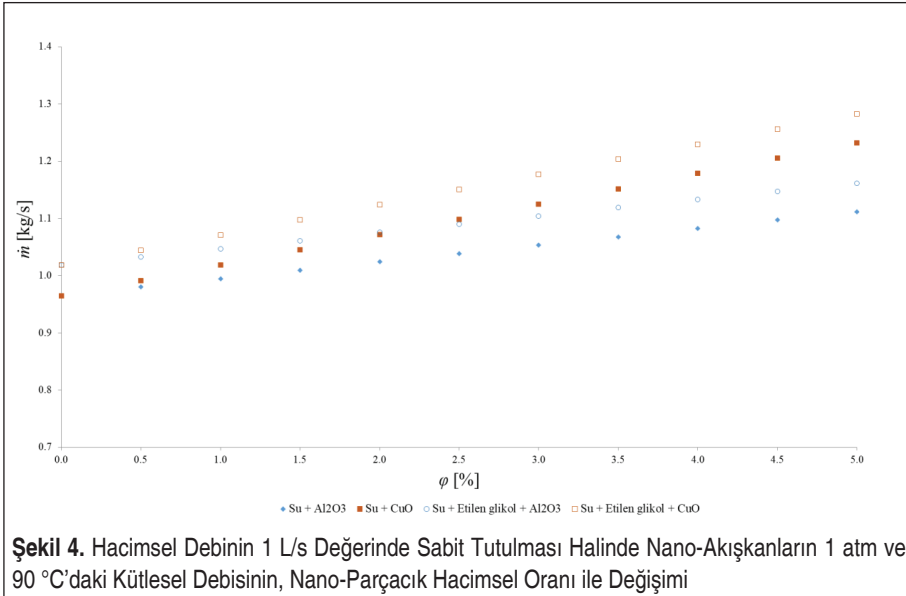


Şekil 3. Su ile Etilen Glikol Karışımının 1 atm ve 90 °C'daki Yoğunluğunun, Etilen Glikolün Hacimsel Oranı ile Değişimi

düşük yoğunluğa ise 1 numaralı akışkanın yani suyun sahip olduğu görülmektedir. Etilen glikolün tek başına kullanımında ortaya çıkan yoğunluktaki bu artış, yine soğutma akışkanının aynı hacimsel debide kullanılması durumunda kütleli debi üzerinde büyük bir etkiye sahip olacaktır.

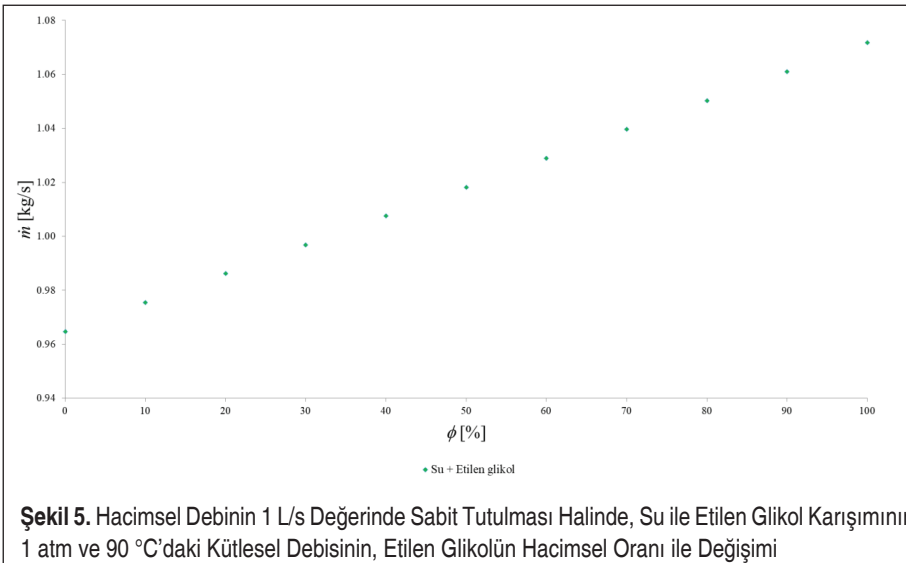
Hacimsel debinin, 1 L/s olarak sabit tutulması durumunda, incelenen nano-akışkanların 1 atm ve 90 °C'daki kütleli debisi ise Şekil 4'te gösterilmiştir.

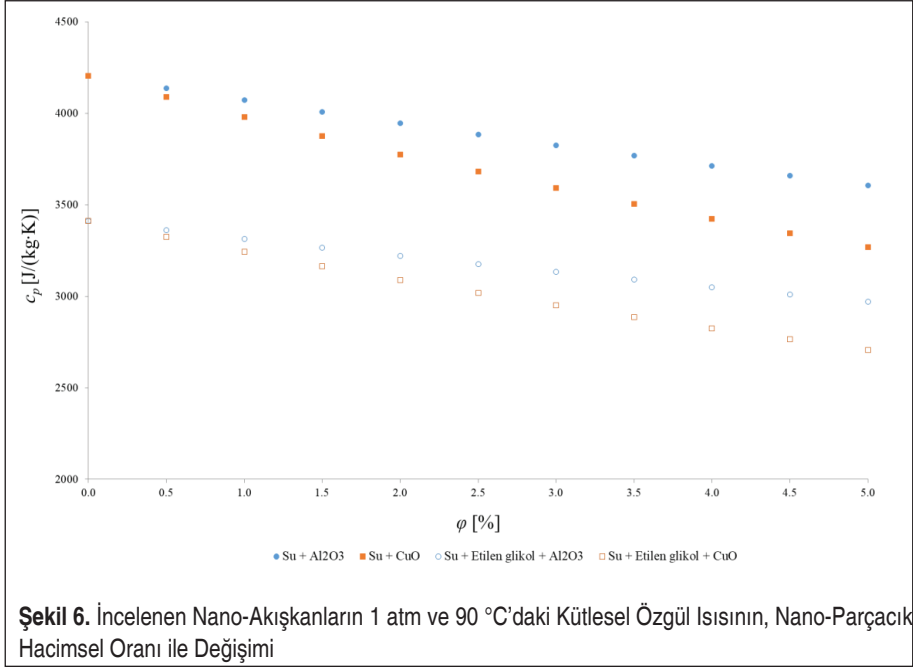
Şekil 4'teki veriler incelendiğinde; hacimsel debinin sabit tutulması durumunda, en yüksek kütleli debiye, doğal olarak en yüksek yoğunluğa sahip olan 51 numaralı nano-akışkanın sahip olduğu, buna karşılık en düşük kütleli debiye ise 1 numaralı akışkanın sahip olduğu görülmektedir. Bu husus yine, soğutma akışkanının aynı hacimsel debide kullanılması durumunda, motor bloğundan birim zamanda çekilecek ısı miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.



Hacimsel debinin yine 1 L/s değerinde sabit tutulması durumunda su + etilen glikol karışımının, 1 atm ve 90 °C'daki kütleli debisinin, etilen glikol hacimsel oranı ile değişimi ise Şekil 5'te gösterilmiştir.

Şekil 5'teki veriler incelendiğinde; hacimsel debinin 1 L/s değerinde sabit tutulması durumunda, en yüksek kütleli debiye, doğal olarak en yüksek yoğunluğa sahip olan





Şekil 6. İncelenen Nano-Akışkanların 1 atm ve 90 °C'daki Kütleli Özgül Isısının, Nano-Parçacık Hacimsel Oranı ile Değişimi

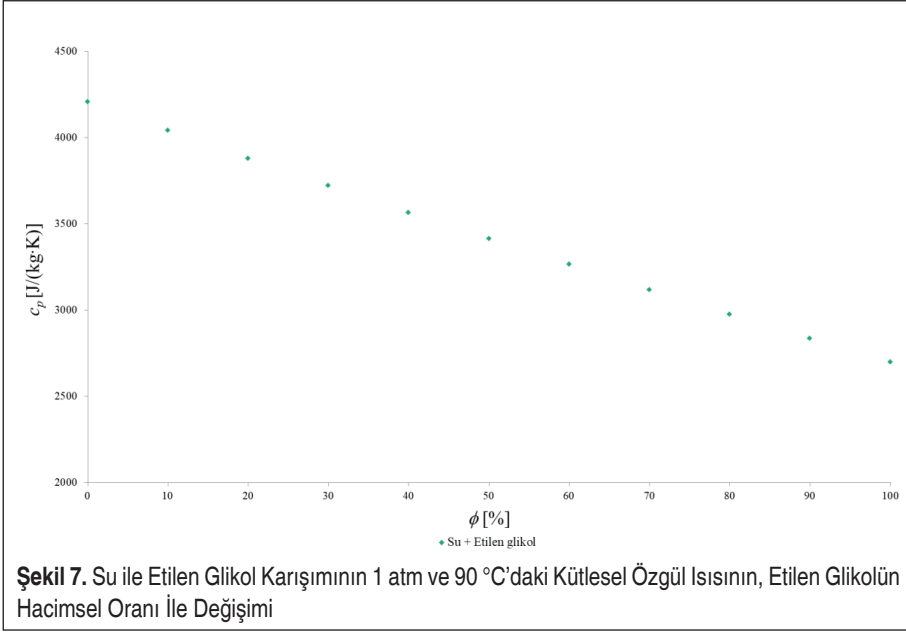
31 numaralı akışkanın yani etilen glikolün sahip olduğu, buna karşılık en düşük kütleli debiye ise 1 numaralı akışkanın sahip görülmektedir. Bu husus yine, soğutma akışkanının aynı hacimsel debisi için, motor bloğundan birim zamanda çekilecek ısı miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

İncelenen nano-akışkanların, 1 atm ve 90 °C'daki kütleli özgül ısısının, nano-parçacık hacimsel oranıyla değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir.

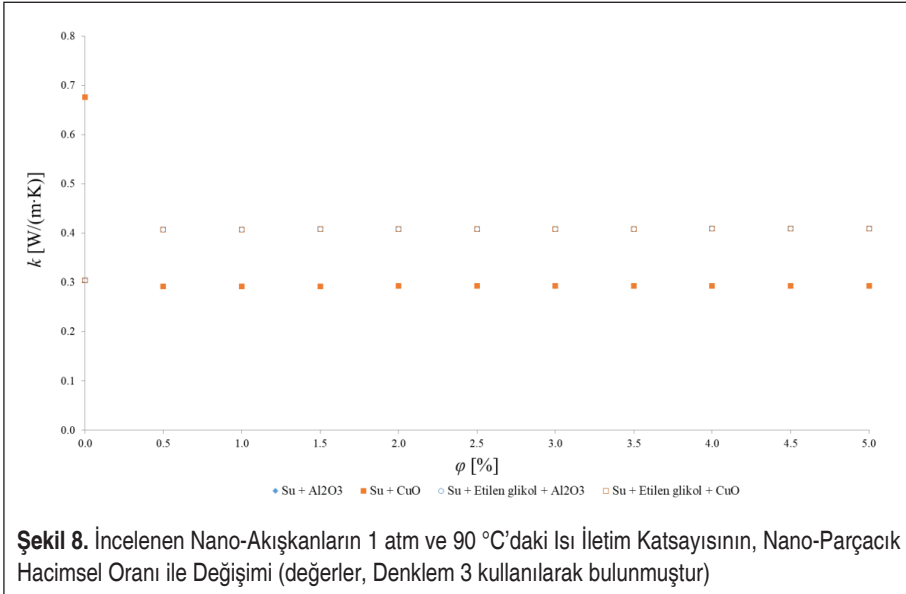
Şekil 6'daki veriler incelendiğinde; en yüksek kütleli özgül ısı değerine 1 numaralı akışkanın yani suyun sahip olduğu buna karşılık en düşük kütleli özgül ısı değerine ise 51 numaralı akışkanın yani %47.5 su + %47.5 etilen glikol + %5 CuO nano-akışkanının sahip olduğu görülmektedir. Bu husus ise, soğutma akışkanının aynı kütleli debide kullanılması durumunda motor bloğundan birim zamanda çekilen ısı miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Su + etilen glikol karışımının, 1 atm ve 90 °C'daki kütleli özgül ısısının, etilen glikol hacimsel oranı ile değişimi ise Şekil 7'de gösterilmiştir.

Şekil 7'deki veriler incelendiğinde, en yüksek kütleli özgül ısıya 1 numaralı akışkanın yani suyun sahip olduğu, buna karşılık en düşük kütleli özgül ısıya ise 31 numaralı akışkanın yani etilen glikolün sahip görülmektedir. Bu husus yine motor bloğundan birim zamanda çekilecek ısı miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

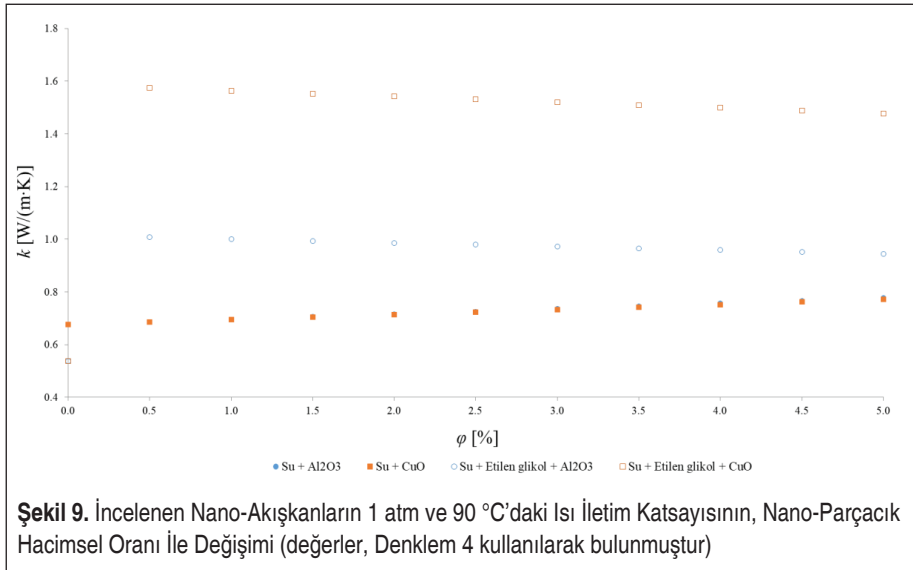


Bu çalışmada incelenen nano-akışkanların 1 atm ve 90 °C'daki ısı iletim katsayısının nano-parçacık hacimsel oranı ile değişimi, Denklem 3, Denklem 4 ve Denklem 5 kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmış ve sonuçlar sırasıyla Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir.



Denklem 3'teki korelasyon kullanılarak elde edilen Şekil 8'deki grafikler incelendiğinde; en yüksek ısı iletim katsayısına 1 numaralı akışkanın yani suyun sahip olduğu, buna karşılık en düşük ısı iletim katsayısına ise 12 numaralı akışkanın yani %99.5 su + %0.5 CuO nano-akışkanının sahip olduğu görülmektedir. Suya, Al₂O₃ veya CuO nano-parçacıklarının eklenmesinin, karışımın ısı iletim katsayısını yükseltmesi beklenirken düşürdüğü görülmüştür. Bu durum, Denklem 3'teki korelasyonun, su + etilen glikol temel akışkanı için geçerli olmasından ileri gelmektedir.

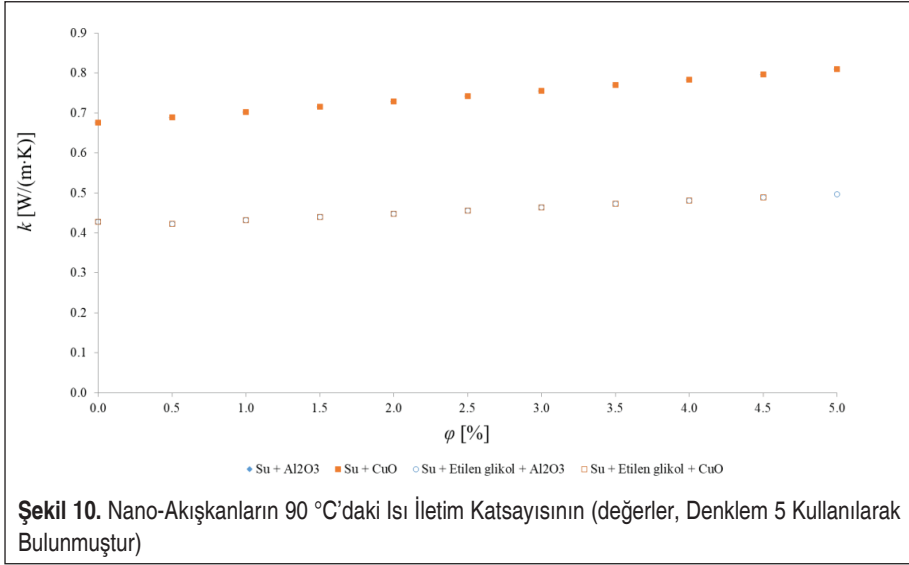
Denklem 4 kullanılarak elde edilen Şekil 9'daki grafikler incelendiğinde ise; en yüksek ısı iletim katsayısına 42 numaralı akışkanın yani %49.75 su + %49.75 etilen glikol + %0.5 CuO nano-akışkanının sahip olduğu, buna karşılık en düşük ısı iletim katsayısına ise 26 numaralı akışkanın yani %50 su + %50 etilen glikol karışımının sahip olduğu görülmektedir.



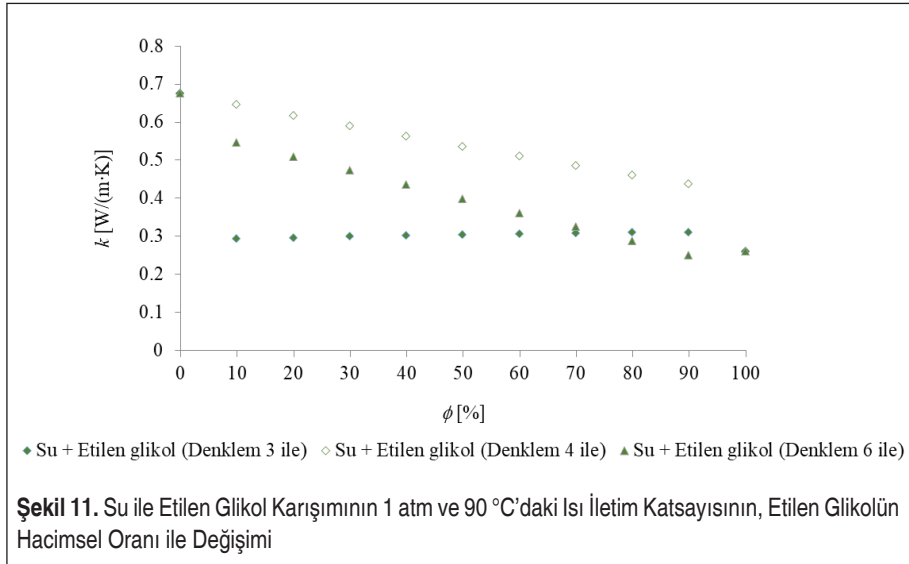
Şekil 9. İncelenen Nano-Akışkanların 1 atm ve 90 °C'daki Isı İletim Katsayısının, Nano-Parçacık Hacimsel Oranı İle Değişimi (değerler, Denklem 4 kullanılarak bulunmuştur)

Denklem 5 kullanılarak elde edilen Şekil 10'daki grafik incelendiğinde ise; en yüksek ısı iletim katsayısına 21 numaralı nano-akışkanın yani %95 su + %5 CuO nano-akışkanının sahip olduğu, buna karşılık en düşük ısı iletim katsayısına ise 32 numaralı nano-akışkanın yani %49.75 su + %49.75 etilen glikol + %0.5 Al₂O₃ nano-akışkanının sahip olduğu görülmektedir.

Su + etilen glikol karışımının, yine 1 atm ve 90 °C'daki ısı iletim katsayısının etilen glikol hacimsel oranı ile değişimi ise, Denklem 3, Denklem 4 ve Denklem 6 kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 11'de verilmiştir.

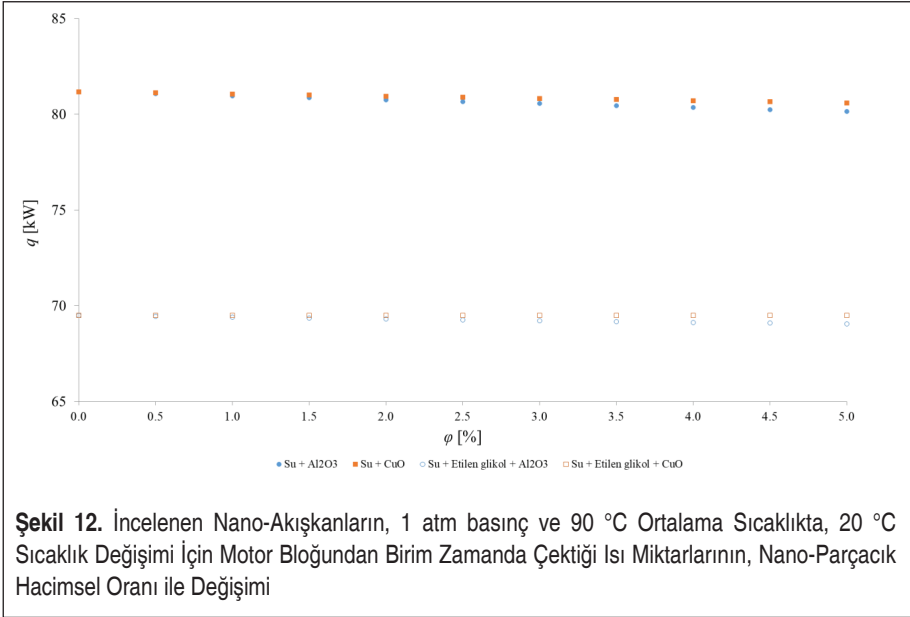


Şekil 10. Nano-Akışkanların 90 °C'daki Isı İletim Katsayısının (değerler, Denklem 5 Kullanılarak Bulunmuştur)



Şekil 11. Su ile Etilen Glikol Karışımının 1 atm ve 90 °C'daki Isı İletim Katsayısının, Etilen Glikolün Hacimsel Oranı ile Değişimi

Şekil 11'de yer alan ve Denklem 3 ile Denklem 4 kullanılarak elde edilen ısı iletim katsayısı grafikleri incelendiğinde; en yüksek ısı iletim katsayısına 1 numaralı akışkanın yani suyun sahip olduğu, buna karşılık en düşük ısı iletim katsayısına ise 31 numaralı akışkanın yani etilen glikolün sahip olduğu görülmektedir. Buna karşılık, Denklem 6 kullanılarak elde edilen grafik incelendiğinde ise; en yüksek ısı iletim katsayısına yine 1 numaralı akışkanın yani suyun sahip olduğu, buna karşılık en düşük ısı iletim

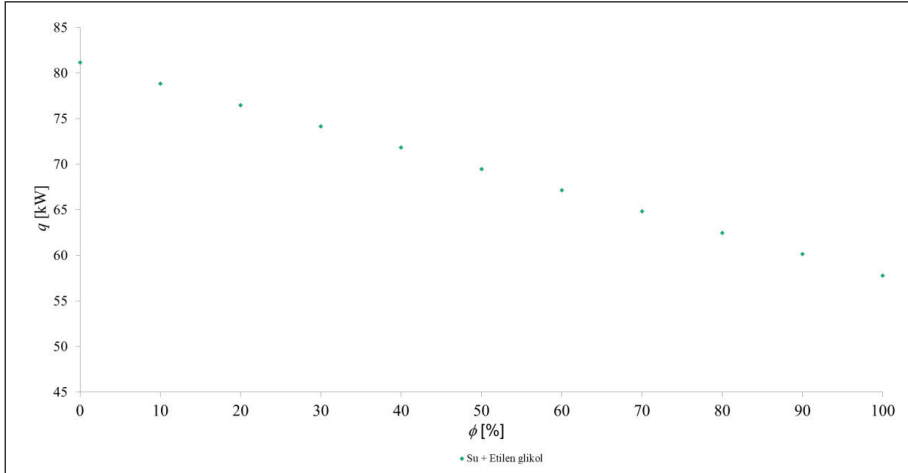


katsayısına ise 30 numaralı akışkanın yani %10 su + %90 etilen glikol karışımının sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, su + etilen glikol karışımının ısı iletim katsayısı, Denklem 4 ve Denklem 6'nın kullanılması durumunda, etilen glikolün hacimsel oranı arttıkça düşmekteyken, Denklem 3'ün kullanılması durumunda ise yükselmektedir.

İncelenen nano-akışkanların, 1 atm basınç ve 90 °C ortalama sıcaklıkta, 20 °C sıcaklık değişimi için motor bloğundan birim zamanda çektiği ısı miktarları Şekil 12'de gösterilmiştir.

Şekil 12'deki grafikler incelendiğinde; birim zamanda en yüksek miktarda ısı çekilmesinin, 1 numaralı akışkanın yani suyun kullanılması durumunda gerçekleştiği, buna karşılık en düşük miktarda ısı çekilmesinin ise 31 numaralı akışkanın yani etilen glikolün kullanılması durumunda gerçekleştiği görülmektedir. Motor bloğundan birim zamanda çekilen ısı miktarının büyüklüğü, motor soğutma sisteminin performansının en önemli göstergesidir. Bununla birlikte, suyun donma sıcaklığının nispeten yüksek olması nedeniyle söz konusu mukayesenin, %50 su + %50 etilen glikol karışımı ile su ve etilen glikol karışımı kullanılarak elde edilen nano-akışkanlar arasında yapılması gerekir. Bu durumda en iyi sonuç, 51 numaralı nano-akışkanın yani %47.5 su + %47.5 etilen glikol + %5 CuO nano-akışkanının kullanılması durumunda ortaya çıkmakta olup artış miktarı yaklaşık olarak %0.01 mertebesindedir.

Diğer taraftan, su + etilen glikol karışımının, 1 atm basınç ve 90 °C ortalama sıcaklıkta, 20 °C sıcaklık değişimi için motor bloğundan birim zamanda çektiği ısı miktarları Şekil 13'te gösterilmiştir.

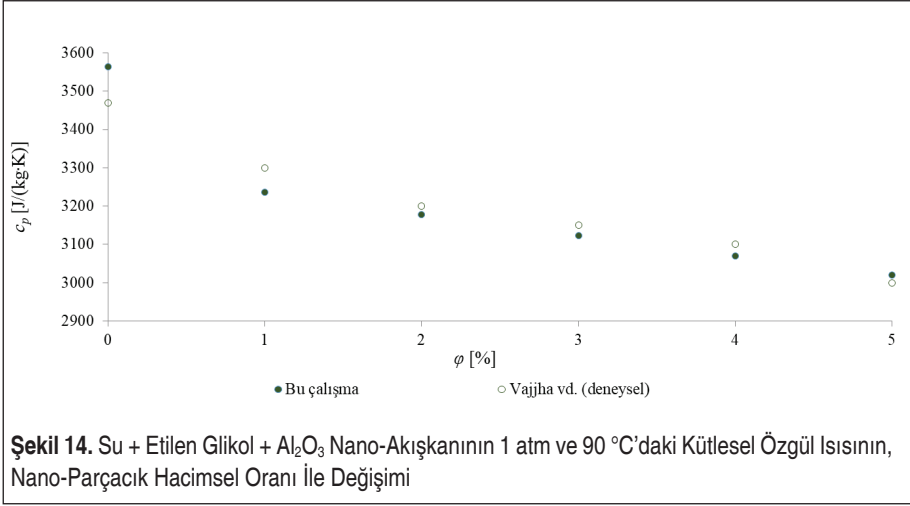


Şekil 13. Su ile Etilen Glikol Karışımının, 1 atm basınç ve 90 °C Ortalama Sıcaklıkta, 20 °C Sıcaklık Değişimi İçin Motor Bloğundan Birim Zamanda Çektiği Isı Miktarlarının, Etilen Glikolün Hacimsel Oranı ile Değişimi

Şekil 13'teki grafik incelendiğinde; birim zamanda en yüksek miktarda ısı çekilmesinin 1 numaralı akışkanın yani suyun kullanılması durumunda gerçekleştiği, buna karşılık en düşük miktarda ısı çekilmesinin ise 31 numaralı akışkanın yani etilen glikolün kullanılması durumunda gerçekleştiği görülmektedir. Motor bloğundan birim zamanda çekilen ısı miktarının büyüklüğü, motor soğutma sisteminin performansının en önemli göstergesidir.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde; genelde, nano-akışkanların ısı iletim katsayısının 50 °C ortalama sıcaklığındaki değeri için incelemeler yapılmıştır. Bununla beraber bu çalışmada, motor soğutma suyu ortalama sıcaklığının genelde 90 °C olması nedeniyle hesaplamalarda ortalama sıcaklık 90 °C olarak seçilmiştir. Ayrıca, 15 numaralı kaynaktan alınan Denklem 5'in ilgili kaynaktan, 85 °C ortalama sıcaklığa kadar kullanılabilmesi önerilmiştir. Korelasyonlarda yer alan; hacimsel derişiklik oranı (φ veya ϕ), temel akışkan oranı (BR) ve C_k parametrelerinin değeri ise bu çalışmada mümkün olduğunca literatürde önerilen değerlerle uyumlu seçilmiştir. Literatürde genel olarak %2.5'e kadar artırılan derişiklik oranı bu çalışmada, literatürden farklı olarak %5'e kadar genişletilerek derişimin daha geniş bir aralıktaki etkisi irdelenmiştir.

Son olarak, su + etilen glikol + Al_2O_3 nano-akışkanının kütleli özgül ısısının, Denklem 2 kullanılarak hesaplanan değerlerinin ve Vajjha vd. [8] tarafından yapılan deneysel bir çalışma sonucunda bulunan değerlerinin nano-parçacık hacimsel oranı ile değişimi Şekil 14'te gösterilmiştir. Bu karşılaştırmanın yapılabilmesi için hesaplama-



larda, Vajjha vd. tarafından yapılan deneysel çalışmadaki gibi %40 su + %60 etilen glikol karışımı kullanılmıştır.

Şekil 14'teki verilere bakıldığında, Al_2O_3 derişimi arttıkça bu çalışmadaki sonuçların deneysel sonuçlara yaklaştığı görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu teorik çalışmada elde edilen sonuçlardan hareketle aşağıdaki değerlendirmelerde bulunulabilir:

- Şekil 2'de; incelenen nano-akışkanlar arasında en yüksek yoğunluğa 51 numaralı nano-akışkanın sahip olduğu, buna karşılık en düşük yoğunluğa ise 1 numaralı akışkanın yani suyun sahip olduğu görülmektedir. Böylece, 51 numaralı nano-akışkanın bu yüksek yoğunluğu, soğutma akışkanının aynı hacimsel debide kullanılması durumunda kütleli debi üzerinde büyük bir etkiye sahip olacaktır.
- Şekil 3'te, analiz edilen akışkanlar arasında en yüksek yoğunluğa 31 numaralı akışkanın yani etilen glikolün sahip olduğu buna karşılık en düşük yoğunluğa ise 1 numaralı akışkanın sahip olduğu görülmektedir. Etilen glikolün tek başına kullanımında ortaya çıkan yoğunluktaki bu artış, yine soğutma akışkanının aynı hacimsel debide kullanılması durumunda kütleli debi üzerinde büyük bir etkiye sahip olacaktır.
- Şekil 4'te; hacimsel debinin sabit tutulması durumunda, en yüksek kütleli debiyi 51 numaralı nano-akışkanın sağladığı, en düşük kütleli debiye ise 1 numaralı akışkanın yol açtığı görülmektedir. Bu husus, motordan çekilecek ısı miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.



- Şekil 5'te, hacimsel debinin yine sabit tutulması durumunda, en yüksek kütleli debiyi, 31 numaralı akışkanın sağladığı, en düşük kütleli debiye ise 1 numaralı akışkanın yol açtığı görülmektedir. Bu husus yine, motordan çekilecek ısı miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.
- Şekil 6'da, en yüksek kütleli özgül ısıyı 1 numaralı akışkanın sağladığı, en düşük kütleli özgül ısıya ise 51 numaralı nano-akışkanının yol açtığı görülmektedir. Bu husus, motordan çekilecek ısı miktarı üzerinde yine önemli bir etkiye sahiptir.
- Şekil 7'de, en yüksek kütleli özgül ısıyı 1 numaralı akışkanın sağladığı, en düşük kütleli özgül ısıya ise 31 numaralı akışkanın yol açtığı görülmektedir. Bu husus yine, motordan çekilecek ısı miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.
- Şekil 8'de; en yüksek ısı iletim katsayısını 1 numaralı akışkanın sağladığı, en düşük ısı iletim katsayısına ise 12 numaralı nano-akışkanın yol açtığı görülmektedir. Suya, Al_2O_3 veya CuO nano-parçacıklarının eklenmesinin, karışımın ısı iletim katsayısını yükseltmesi beklenirken düşürdüğü görülmüştür. Bu durum, Denklem 3'ün, su + etilen glikol temel akışkanı için geçerli olmasından ileri gelmektedir.
- Şekil 9'da; en yüksek ısı iletim katsayısını 42 numaralı nano-akışkanın sağladığı, en düşük ısı iletim katsayısına ise 26 numaralı akışkanın yol açtığı görülmektedir. Isı iletim katsayısının, nano-parçacık hacimsel oranıyla artması, Wasp modelinin geçerliliğini bir kez daha göstermiştir.
- Şekil 10'da; en yüksek ısı iletim katsayısına 21 numaralı nano-akışkanın sahip olduğu, buna karşılık en düşük ısı iletim katsayısına ise 32 numaralı nano-akışkanın nano-akışkanının sahip olduğu görülmektedir.
- Şekil 11'de; Denklem 3 ve Denklem 4 ile elde edilen veriler incelendiğinde, en yüksek ısı iletim katsayısını 1 numaralı akışkanın sağladığı, en düşük ısı iletim katsayısına ise 31 numaralı akışkanın yol açtığı görülmektedir. Denklem 6 ile elde edilen veriler incelendiğinde ise; en yüksek ısı iletim katsayısını yine 1 numaralı akışkanın sağladığı, buna karşılık en düşük ısı iletim katsayısına ise 30 numaralı akışkanın yani %10 su + %90 etilen glikol karışımının yol açtığı görülmektedir. Ayrıca, Denklem 4 ve Denklem 6'ya göre ısı iletim katsayısı, etilen glikolün hacimsel oranı arttıkça düşmekteyken, Denklem 3'e göre ise yükselmektedir.
- Şekil 12'de; en yüksek ısı geçişini, 1 numaralı akışkanın sağladığı, en düşük ısı geçişine ise 31 numaralı akışkanın yol açtığı görülmektedir. Çekilen ısı miktarı, motor soğutma sisteminin performansının en önemli göstergesidir. Ancak, suyun donma sıcaklığının nispeten yüksek olması nedeniyle bu mukayesenin, %50 su + %50 etilen glikol karışımı ile bu karışım kullanılarak elde edilen nano-akışkanlar arasında yapılması gerekir. Bu durumda en iyi sonucu, 51 numaralı nano-akışkanın sağladığı görülür.
- Şekil 13'te; en yüksek miktarda ısı geçişini yine 1 numaralı akışkanın sağladığı,

en düşük miktarda ısı geçişine ise yine 31 numaralı akışkanın yol açtığı görülmektedir. Çekilen ısı miktarı, motor soğutma sisteminin performansının en önemli göstergesidir.

- Su + etilen glikol + Al_2O_3 nano-akışkanının kütleli özgül ısısının, Denklem 2 kullanılarak hesaplanan değerlerinin ve Vajjha vd. [8] tarafından yapılan deneysel bir çalışma sonucunda bulunan değerlerinin nano-parçacık hacimsel oranı ile değişiminin görüldüğü Şekil 14'te, Al_2O_3 derişiminin artmasıyla bu çalışma sonuçlarının, deneysel sonuçlara yaklaştığı görülmektedir.
- Şekil 14'te, Al_2O_3 nano-parçacığının %0 ila %5 arasındaki derişimi için Denklem 2 ile bulunan kütleli özgül ısı değerlerinin 8 numaralı referansta deneysel olarak elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında değerlerin, birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.
- Ayrıca bu çalışmayı tamamlayacak şekilde bir deneysel çalışma yapılması da farklı nano-parçacık kullanımının gerçek etkisini gösterecektir. Bu teorik çalışmada elde edilen veriler literatürdeki değerlerle büyük oranda uyumlu olsa da bu değerlerin, deneysel bir çalışma ile desteklenmesi gerekir.
- Literatürde sadece su ile veya sadece etilen glikol ile yapılmış çalışmalar bulmak mümkündür. Ancak, su ile etilen glikol karışımı kullanılarak oluşturulan nano-akışkanlar, genellikle bir çeşit nano-parçacık kullanılarak elde edilmiş olup farklı nano-parçacıkların yer aldığı çalışmalar bulmak nispeten zordur. Bu nedenle, Al_2O_3 ve CuO nano-parçacıklarının kullanıldığı bu çalışma, literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır.
- Kaynaklarda [14], nano-parçacık derişikliğinin artışı ile kütleli özgül ısı değerinin sürekli artmadığı, %2 derişiklik değerinden daha büyük oranlar için karışım içerisinde asılı tutulabilecek nano-parçacık miktarının, derişiklik artış oranı ile paralel olarak artmadığı, bu değerden itibaren derişiklik artışı ile karışım içerisinde çökmenin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu husus, nano-akışkan alanında çalışacak araştırmacılar için dikkate değer bir durumdur.
- Farklı nano-parçacıkların kullanıldığı bu teorik çalışmanın bir devamı olarak, hibrit nano-akışkanların kullanıldığı deneysel ve/veya teorik çalışmalara ihtiyaç olduğu açıktır.
- Farklı akışkanlar kullanılarak yapılan soğutmanın incelendiği bu çalışmanın sonuçlarının, motorun çalışma performansına nasıl etki edeceğini konu alan ve bu çalışmanın devamı niteliğinde olacak bir çalışma yapılması mümkündür ve yapılacak bu çalışmanın, içten yanmalı motorlar alanında çalışacak araştırmacılara yararlı olacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, motor soğutma sistemlerinde nano-akışkan kullanımının, aynı sıcaklık



farkının oluşmasının istendiği durumlarda daha fazla ısı çekilmesini sağlayacağı veya amaçlanan soğutma için daha az miktarda akışkan kullanımını gerektireceği açıktır.

KISALTMALAR, SEMBOLLER VE İNDİSLER:

Kısaltmalar:

ICE İçten yanmalı motor
TCI Turbo-kompresör ateşlemeli

Semboller:

BR Taban akışkan oranı
 c_p Kütlelesel özgül ısı [$J/(kg \cdot K)$]
 f Sürtünme katsayısı, [-]
 k Isı iletim katsayısı, [$W/(m \cdot K)$]
 k^* Filippov deneysel katsayısı, [-]
 q Isı miktarı, [W]
 ρ Yoğunluk, [kg/m^3]
 ϕ Etilen glikolün hacimsel oranı, [%]
 φ Nano-parçacık hacimsel oranı, [%]

Alt indisler:

a Akışkan
 na Nano-akışkan
 p Parçacık

KAYNAKÇA

1. **Bilen K.** 1998. “Turbo Doldurulmalı Bir Dizel Motoru İçin Ara Soğutucu Dizaynı”, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale-Türkiye.
2. **Sedef A.Y.** 2017. “First and Second Law Analysis of Compact Heat Exchangers used for Intercooling Purposes”, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara-Türkiye.
3. Kale Oto Radyatör Sanayi ve Ticaret A.Ş.
4. **Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S.** 2015. “Principles of Heat and Mass Transfer”, 7th edition, John Wiley Sons, New York.
5. **Ginnings D.C., Corruccini R.J.** “Enthalpy, Specific Heat, and Entropy of Aluminum Oxide from 0° to 900° C”, U.S. Department of Commerce National Bureau of Standards, Research Paper RP1797 Cilt 38, Sayfa 593-600, Haziran 1947.



6. **Bohne D., Fischer S., Obermeier E.** “Thermal, Conductivity, Density, Viscosity, and Prandtl-Numbers of Ethylene Glycol-Water Mixtures”, Physical Chemistry Chemical Physics, Sayfa 739-742, Ağustos 1984.
7. **Pak B.C., Cho Y.I.** 1997. “Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles”, Experimental Heat Transfer, 11:151-170.
8. **Vajjha R.S., Das D.K.** “Measurements of Specific Heat and Density of Al₂O₃ Nanofluid”, American Institute of Physics, 978-0-7354-0593-6/08, Ekim 2008.
9. **Barbés B., Páramo R., Blanco E., Casanova C.** 2014. “Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity Measurements of CuO Nanofluids”, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Cilt 115:, Sayfa 1883-1891.
10. **Usri N.A., Azmi W.H., Mamat R., Abdul Hamid K., Najafi G.** 2015. “Thermal Conductivity Enhancement of Al₂O₃ Nanofluid in Ethylene Glycol and Water Mixture”, 2015 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies.
11. **Senthilraja S., Vijayakumar K., Gangadevi R.** “A Comparative Study on Thermal Conductivity of Al₂O₃/Water, CuO/Water and Al₂O₃ – CuO/Water Nanofluids”, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, Cilt 10, No. 4, Sayfa 1449-1458, Ekim-Kasım 2015.
12. **Dawood H.K., Mohammed H.A., Sidik N.A.C., Munisamy K.M.** “Numerical Investigation on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of Laminar and Turbulent Flow in an Elliptic Annulus Utilizing Nanofluid”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Cilt 66, Sayfa 148-157, August 2015.
13. **Bilen K., Dağdır K., Arcaklıoğlu E.** “Al₂O₃ ve CNTs Nano-parçacıklarının R1234yf Soğutucu Akışkanının Termofiziksel Özelliklerine Etkisinin Teorik Olarak Araştırılması”, 22. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi (ULIBTK – 2019), Kocaeli, 11-14 Eylül 2019.
14. **Karakaya U., Gürü M., Sözen A., Aydın D.Y., Bilici İ.** 2019. “Nano Mineralojik Akışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Politeknik Dergisi, Cilt 22, Sayı 3, Sayfa 619-626.
15. **Timofeeva E.V., Roubort J.L., Singh D.** “Particle Shape Effects on Thermophysical Properties of Alumina Nanofluids” Journal of Applied Physics, Cilt 014304, Sayfa 1-10 Temmuz 2009.
16. **Filippov L.P.** “Liquid Thermal Conductivity Research at Moscow University”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Cilt 11, Sayfa 331-345, Haziran 1965.