



Nanoakışkanların elektriksel iletkenlik ve stabilitelerinin yapay sinir ağları ile modellenmesi: Kütleli oran ve sıcaklığa bağlı korelasyon türetilmesi

Modeling electrical conductivity and stability of nanofluids using artificial neural network: Derivation of correlation dependent on mass ratio and temperature

Ömer Genç^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 51240, Niğde, Türkiye

Öz

Hazırlanma sürelerinin uzun olması ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesinin zahmetli olması nanoakışkan çalışmalarını yapay zekâ destekli modelleme çalışmalarına yönlendirmiştir. Bununla birlikte yapılan modelleme çalışmaları ağırlıklı olarak ısı iletkenlik ve viskozite üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada, nanoakışkan çalışmalarında genellikle ihmal edilen stabilite ve elektriksel iletkenlik göz önüne alınarak, %0.1-%3 kütleli oran ve 20°C-70°C sıcaklık aralığındaki MgO/EG nanoakışkanların pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyelini tahmin etmek için bir yapay sinir ağları modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin MSE ve R² değeri sırasıyla 0.011118 ve 0.99987 iken, pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyeli için ortalama mutlak MoD değerleri ise sırasıyla %0.11, %0.78 ve %0.74 olarak belirlenmiştir. Bahsi geçen bu performans parametreleri geliştirilen ağı yüksek performanslı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca model verileri kullanılarak literatürde ilk defa bu üç özellik için de geçerli, katsayıları birbirinden farklı ortak bir korelasyon ortaya konulmuştur. Yeni korelasyonun pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyeli için ortalama mutlak MoD değerleri sırasıyla %0.35, %2.08 ve %1.54'tür. Deneysel veriler ile mutlak % hata değerlerini ortaya çıkaran bu değerler yeni korelasyonun yüksek doğrulukta tahmin yeteneğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Nanoakışkan, Stabilite, Zeta potansiyeli, Elektriksel iletkenlik, Yapay sinir ağları

1 Giriş

Isı transfer uygulamalarında soğutucu akışkanlardan beklenen temel özellik yüksek termal iletkenlik ve düşük viskozitedir. Soğutucu akışkan olarak genellikle su kullanıldığı göz önüne alındığında bu iki özellik üzerinde herhangi bir değişikliğin çok da mümkün olmadığı ortadadır. Daha yüksek termal iletkenlik veya daha düşük viskozite için soğutucu akışkanın tamamen değiştirilmesi gerekmektedir. 90'lı yıllarda Choi [1] tarafından gündeme getirilen nanoakışkanlar, temel akışkan (genellikle su) içerisine nano boyutta partiküller eklenmesi ile elde edilen ve termal iletkenliği ve viskozitesi genellikle temel akışkana göre

Abstract

The lengthy preparation times and the laborious process of determining their thermophysical properties have directed nanofluid studies towards artificial intelligence-supported modeling efforts. Moreover, these modeling studies have primarily focused on thermal conductivity and viscosity. In this study, considering the often neglected aspects of stability and electrical conductivity in nanofluid research, an artificial neural network model was developed to predict the pH, electrical conductivity, and zeta potential of MgO/EG nanofluids within a mass ratio range of 0.1%-3% and a temperature range of 20°C-70°C. The MSE and R² values of the developed model are 0.011118 and 0.99987, respectively, while the mean absolute percentage deviations (MAPD) for pH, electrical conductivity, and zeta potential are determined to be 0.11%, 0.78%, and 0.74%, respectively. These performance parameters revealed that the developed network is high-performance. Additionally, for the first time in the literature, a common correlation with different coefficients for these three properties was established using the model data. The new correlation has mean absolute percentage deviations of 0.35%, 2.08%, and 1.54% for pH, electrical conductivity, and zeta potential, respectively. These values, which reveal the absolute % error values with experimental data, reveal the high accuracy prediction ability of the new correlation.

Keywords: Nanofluid, Stability, Zeta potential, Electrical conductivity, Artificial neural networks

yüksek yeni bir akışkan olarak karşımıza çıkmaktadır. Nanoakışkanların temel akışkana göre daha yüksek termal iletkenlik [2-5] ve viskoziteye [6-8] sahip olduğu ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Nanoakışkanların temel akışkana göre yüksek termal iletkenlik göstermeleri istenen bir durum iken yüksek viskoziteye sahip olmaları pompalama gücünde artışa sebep olacağından arzu edilen bir durum değildir. Literatürde mevcut olan nanoakışkan çalışmalarının büyük bir kısmı bu iki temel özelliğin belirlenmesi, optimizasyonu veya modellenmesi üzerinedir [9-13].

Herhangi bir nanoakışkanın bir ısı transfer uygulamasında uzun süreli kullanılabilmesi için

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: omergenç@ohu.edu.tr (Ö. Genç)

Geliş / Received: 14.05.2024 Kabul / Accepted: 10.06.2024 Yayınlanma / Published: 15.07.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1483840

nanoakışkan stabilitesinin uygun bir değerde olması zorunludur. Stabil olmayan bir nanoakışkanın yüksek termal iletkenliğe ve/veya düşük viskoziteye sahip olması uygulamada kullanımı açısından hiçbir anlam ifade etmemektedir [14]. Stabilite en basit olarak, temel akışkan içerisine eklenen nano boyuttaki partiküllerin akışkan içerisinde homojen dağılımını ifade eden bir özellik olarak açıklanabilir. Literatürde nanoakışkanların stabiliteyi yüzey aktif madde kullanımı [15-17] ve/veya nanoakışkanın pH değişimi [18-20] ile ayarlanabilmekte, sedimentasyon [21-23] ve/veya zeta potansiyel [24-26] ölçümleri ile de belirlenebilmektedir. Singh ve ark. [27], yüzey aktif madde olarak PVP kullanarak etanol bazlı bir Ag-nanoakışkan hazırlamışlar ve stabilitesini sedimentasyon yöntemi incelemişlerdir. Söz konusu nanoakışkanın 1 ay boyunca çökme belirtisi göstermediğini belirlemişlerdir. Lee [28], Al₂O₃ ile farklı pH değerlerine sahip nanoakışkanlar üzerinde çalışmıştır. Deneyler, nanoakışkanların pH değeri 1.7 olduğunda, çökelti halindeki partikül boyutunun %18 azaldığını, pH değeri 7.66 olduğunda ise çökelti halindeki partikül boyutunun %51 arttığını göstermiştir. Daha fazla partikülün pH 7.66 değerinde bir araya gelmesine elektriksel itme kuvvetindeki azalmanın sebep olduğunu bildirmişlerdir. Nanoakışkanın pH değeri ile zeta potansiyel değeri dolayısıyla stabilitesi birbiriyle ilişkilidir. pH değerinin zeta potansiyel değeri (stabilite) üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından da rapor edilmiştir [29-31].

Nanoakışkan çalışmalarında son yıllara kadar göz ardı edilen özellik ise elektriksel iletkenliktir. Elektronik cihazların soğutulması, batarya soğutma ve PEM yakıt pili soğutma gibi uygulamalarda nanoakışkan kullanımında nanoakışkanın elektriksel iletkenliğinin de göz önüne alınması sistem verimi açısından kaçınılmazdır. Ganguly ve ark. [32], partikül oranı ve sıcaklığın alümina bazlı nanoakışkanların elektriksel iletkenliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Partikül oranı ile elektriksel iletkenliğin lineer olarak arttığını fakat sıcaklık ile neredeyse hiçbir değişiklik olmadığını bildirmişlerdir. Luis ve Biswas [33] ise benzer şekilde TiO₂ nanoakışkanların partikül oranı ile elektriksel iletkenliğin lineer olarak arttığını ve yüksek iyon konsantrasyonları için anlamlı bir etkinin olmadığını gözlemlenmişlerdir. Örneğin; PEM yakıt pillerinde kullanılacak olan bir nanoakışkanın soğutma performansının yanı sıra elektriksel iletkenliğinin de dikkate alınması şarttır. Çünkü soğutucu olarak kullanılacak nanoakışkanların sürekli olarak PEM yakıt hücresinde taşınacak olan elektrik iyonlarına maruz kalması soğutucu akışkanın elektrolizine neden olabilmektedir. Birçok araştırmacı, PEM yakıt pilleri için kullanılacak soğutma sıvılarının maksimum elektriksel iletkenliğinin 5 S/cm olması gerektiğini önermiştir [34-36].

Nanoakışkan çalışmalarında termal iletkenlik, viskozite, özgül ısı, yoğunluk, stabilite, elektriksel iletkenlik gibi göz önüne alınması gereken çok sayıda parametre olması ve deneysel çalışmaların uzun zaman gerektirmesi araştırmacıları teorik çalışmalara yönlendirmektedir. Literatürde nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin (termal iletkenlik, viskozite, özgül ısı ve yoğunluk) tahmini için birçok matematiksel model önerilmiştir. Fakat stabilite ve elektriksel iletkenlik ile ilgili sınırlı sayıda model

mevcuttur. Modelleme çalışmalarında günümüzde popüler olan yaklaşım yapay sinir ağları (YSA) ile modelleme yaklaşımıdır. Yapay sinir ağları aynı anda çok sayıda girdi ve çıktı arasında sahip olduğu gelişmiş algoritmalar sayesinde oldukça yakın tahminler ortaya koyabilen bir modelleme yöntemidir. Nanoakışkanlar ile ilgili de çok sayıda YSA modelleme çalışması mevcuttur. Papari ve ark. [10], tek duvarlı karbon nanotüplerin ve çok duvarlı karbon nanotüplerin yağ, su ve etilen glikol içinde kullanılması ile elde edilen farklı nanoakışkanların termal iletkenliklerini tahmin etmek için yapay sinir ağı yöntemini kullanmışlardır. Tahmin edilen veriler ile deneysel veriler arasındaki iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Hojjat ve ark. [11] ise Al₂O₃, TiO₂ ve CuO nanoparçacıklarının kütlece %0.5 karboksimetil selüloz (CMC) sulu çözeltisindeki termal iletkenliğini üç katmanlı ileri beslemeli bir yapay sinir ağı kullanarak modellemişlerdir. Nanoparçacık hacim oranı ve sıcaklığa bağlı termal iletkenlik tahmini için yapay sinir ağı modelleri önermişlerdir. Önerilen modellerin deneysel veriler ile iyi bir uyum içinde olduğunu bildirmişlerdir. Longo ve ark. [37] sıcaklık, nanopartikül hacim oranı, nanopartikül çapı ve nanopartikül termal iletkenliğini girdi parametreleri olarak ele alıp Al₂O₃-su ve TiO₂-su nanoakışkanların termal iletkenliğini tahmin etmek için iki farklı yapay sinir ağı modeli sunmuşlardır. Her iki model de tahmin edilen verilerin deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte 4 girişli modelin daha iyi performans gösterdiğini rapor etmişlerdir. Esfe ve ark. [38] deneysel verileri yapay sinir ağları ile modelleyerek MgO/EG (Etilen Glikol) nanoakışkanların termal iletkenliğini modellemişlerdir. MgO/EG nanoakışkanların termal iletkenliğini tahmin etmek için beslemeli çok katmanlı algılayıcı bir yapay sinir ağı kullanmışlardır. Giriş parametreleri olarak hacim oranı, parçacık boyutu ve sıcaklığı dikkate almışlar ve tahmin edilen sonuçların deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin modellenmesi ile ilgili çok sayıda çalışma olmasına rağmen stabilite ve elektriksel iletkenlik ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, MgO/EG nanoakışkanın farklı kütle oran ve sıcaklık için pH, zeta potansiyeli ve elektriksel iletkenliği yapay sinir ağları ile modellenmiştir. MSE (en küçük kareler yöntemi) ve R² performans parametreleri göz önüne alınarak çok katmanlı ağ modeli için en uygun nöron sayıları belirlenmiştir. Ek olarak, model verileri kullanılarak MgO/EG nanoakışkanların pH, zeta potansiyeli ve elektriksel iletkenliği için kütle oran ve sıcaklığa bağlı yeni bir korelasyon önerilmiştir.

2 Verilerin toplanması

Çalışmada kullanılan veriler Adio ve ark. [39] tarafından yapılmış olan deneysel çalışmadan alınmıştır. 5 farklı kütle oranında (%0.1, %0.5, %1, %2, %3) hazırlanan 20 nm boyutundaki MgO partikülleri kullanılarak üretilen MgO/EG nanoakışkanların 11 farklı sıcaklık değeri (20-70°C) için pH ve elektriksel iletkenlikleri ölçülen bu çalışmada zeta potansiyel değerleri sadece 4 farklı pH için ölçülmüştür. 11

farklı sıcaklık değerine karşılık gelen zeta potansiyel verilerini elde edebilmek için öncelikle eğri uydurma yöntemi ile R^2 'si 0.9843 olan ve **Denklem 1**'de verilen eşitlik elde edilmiştir. Bu eşitlik kullanılarak arzu edilen pH'lara karşılık gelen zeta potansiyelleri hesaplanmıştır. **Tablo 1**'de farklı kütle oran ve sıcaklığa karşılık gelen pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyel verileri listelenmiştir.

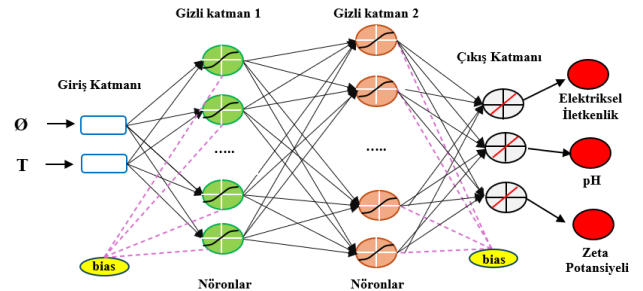
Tablo 1. YSA model çalışmasında kullanılan veriler

| Kütle oran (%) | Sıcaklık (°C) | pH | Elektriksel iletkenlik (µs/cm) | Zeta potansiyeli (mV) |
|----------------|---------------|-------|--------------------------------|-----------------------|
| 0.1 | 20 | 9.71 | 2.77 | 34.29 |
| 0.1 | 25 | 9.65 | 3.00 | 35.61 |
| 0.1 | 30 | 9.55 | 3.17 | 37.64 |
| 0.1 | 35 | 9.42 | 3.45 | 40.28 |
| 0.1 | 40 | 9.31 | 3.78 | 42.51 |
| 0.1 | 45 | 9.23 | 4.28 | 44.05 |
| 0.1 | 50 | 9.18 | 4.84 | 45.16 |
| 0.1 | 55 | 9.14 | 5.73 | 45.83 |
| 0.1 | 60 | 9.10 | 6.80 | 46.73 |
| 0.1 | 65 | 9.07 | 8.03 | 47.39 |
| 0.1 | 70 | 9.03 | 8.92 | 48.06 |
| 0.5 | 20 | 10.22 | 6.24 | 24.08 |
| 0.5 | 25 | 10.13 | 6.69 | 25.85 |
| 0.5 | 30 | 9.98 | 7.08 | 28.96 |
| 0.5 | 35 | 9.87 | 7.47 | 31.19 |
| 0.5 | 40 | 9.76 | 7.98 | 33.42 |
| 0.5 | 45 | 9.60 | 8.59 | 36.52 |
| 0.5 | 50 | 9.50 | 9.20 | 38.51 |
| 0.5 | 55 | 9.38 | 9.82 | 40.95 |
| 0.5 | 60 | 9.25 | 10.66 | 43.63 |
| 0.5 | 65 | 9.16 | 11.22 | 45.41 |
| 0.5 | 70 | 9.09 | 11.94 | 46.94 |
| 1 | 20 | 10.38 | 8.26 | 20.77 |
| 1 | 25 | 10.29 | 8.70 | 22.54 |
| 1 | 30 | 10.15 | 9.43 | 25.40 |
| 1 | 35 | 10.04 | 9.76 | 27.63 |
| 1 | 40 | 9.91 | 10.27 | 30.32 |
| 1 | 45 | 9.78 | 11.10 | 32.96 |
| 1 | 50 | 9.70 | 11.66 | 34.53 |
| 1 | 55 | 9.53 | 12.06 | 38.05 |
| 1 | 60 | 9.39 | 12.62 | 40.74 |
| 1 | 65 | 9.28 | 13.12 | 42.97 |
| 1 | 70 | 9.18 | 13.56 | 45.16 |
| 2 | 20 | 10.44 | 11.10 | 19.65 |
| 2 | 25 | 10.29 | 11.72 | 22.54 |
| 2 | 30 | 10.17 | 12.34 | 24.98 |
| 2 | 35 | 10.02 | 13.01 | 28.08 |
| 2 | 40 | 9.88 | 13.56 | 30.98 |
| 2 | 45 | 9.75 | 14.01 | 33.63 |
| 2 | 50 | 9.60 | 14.40 | 36.52 |
| 2 | 55 | 9.46 | 14.35 | 39.41 |
| 2 | 60 | 9.32 | 14.40 | 42.27 |
| 2 | 65 | 9.19 | 14.63 | 44.95 |
| 2 | 70 | 9.12 | 14.91 | 46.28 |
| 3 | 20 | 10.93 | 13.12 | 9.65 |
| 3 | 25 | 10.80 | 14.01 | 12.33 |
| 3 | 30 | 10.71 | 14.96 | 14.11 |
| 3 | 35 | 10.57 | 15.58 | 16.97 |
| 3 | 40 | 10.39 | 16.47 | 20.52 |
| 3 | 45 | 10.24 | 17.20 | 23.62 |
| 3 | 50 | 10.12 | 17.64 | 26.10 |
| 3 | 55 | 9.92 | 17.87 | 30.07 |
| 3 | 60 | 9.81 | 18.10 | 32.30 |
| 3 | 65 | 9.67 | 17.99 | 35.20 |
| 3 | 70 | 9.54 | 17.37 | 37.84 |

$$Zeta\ potansiyeli = 230.79973 - 20.2313 * pH \quad (1)$$

3 Yapay sinir ağları modeli

Bu çalışmada, MgO/EG nanoakışkanı için literatürde mevcut olan [39], sıcaklık ve kütle oranına bağlı deneysel pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyel verileri kullanılarak bir YSA modeli geliştirilmiştir. Yapay sinir ağları basitlikleri, verileri hızlı işlemeleri ve mühendislik görevlerini kolaylaştırmaları gibi avantajlarını kullanarak giriş ve çıkış değişkenleri arasında doğrusal olmayan fonksiyonların eşleştirilmesi için bir araç sağlarlar. Bir giriş, bir çıkış ve en az bir gizli katmandan oluşan çok katmanlı algılayıcı (MLP) mimari yapılar YSA'larda yaygın olarak kullanılan mimari yapı olarak öne çıkmaktadır. MLP mimarisine sahip ağlar, çok katmanlı yapıları nedeniyle yüksek öğrenme kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle bu çalışmada MLP mimarisine sahip bir YSA modeli tercih edilmiştir. Geliştirilen ağın mimari yapısı Şekil 1'de verilmiştir. MgO kütle oranı ve sıcaklığı, çıkış katmanındaki pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyelini tahmin etmek için giriş parametreleri olarak tanımlanmıştır. MLP ağları tipik olarak nöronlar olarak bilinen ve modelin tahmin kapasitesini önemli ölçüde etkileyen hesaplama birimlerinden oluşan gizli katmanlar içerir. Gizli katmanların ve nöronların sayısı modelin tahmin doğruluğunun belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar. Modelin performansı değerlendirilerek en uygun konfigürasyonlar belirlenir. Elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyeli tahmini için geliştirilen ağda iki gizli katman tercih edilmiş ve her iki gizli katmanda da 10 ila 15 arasında değişen çeşitli nöron kombinasyonları test edilmiştir. Ağ eğitimi için en düşük ortalama karesel hatayı (MSE) ve en yüksek R^2 değerini veren kombinasyon gizli katmanlardaki nöron sayılarının belirlenmesinde kullanılmıştır.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan ağın şematik yapısı

YSA modelleme çalışmalarında eğitim, test ve doğrulama amaçlı yeterli miktarda verinin, doğru oranlarda uygun şekilde gruplandırılmış olması esastır. Bu çalışmada MgO/EG nanoakışkanın pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyelini %0.1-3 kütle oran aralığında ve 20-70 °C sıcaklık aralığında tahmin etmek için toplam 55 deneysel veri noktası kullanılmıştır. Literatürdeki YSA çalışmaları incelendiğinde eğitim için %70, test için %15 ve doğrulama verileri için %15 dağılım oranının yüksek performans sağladığı görülmektedir [24, 40]. Bu nedenle bu çalışmada veri gruplaması için bu oranlar tercih edilmiştir. Eğitim için Levenberg-Marquardt (LM) algoritması kullanılırken, gizli katman ve çıkış katmanları için sırasıyla Tan-Sig (**Denklem**

2) ve Purelin (Denklem 3) transfer fonksiyonları kullanılmıştır.

$$\text{TanSig}(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (2)$$

$$\text{purelin}(x) = x \quad (3)$$

Geliştirilen YSA modelinin performansı literatürde yaygın olarak kullanılan performans kriterleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneysel ve YSA modeli arasındaki hata oranını veren sapma marjı (MoD), performans göstergesi olarak seçilen belirleme katsayısı (R^2) ve ortalama karesel hata (MSE) aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{exp}(i)} - X_{\text{ANN}(i)})^2 \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{exp}(i)} - X_{\text{ANN}(i)})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{\text{exp}(i)})^2} \quad (5)$$

$$\text{MoD} (\%) = \left[\frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{ANN}}}{X_{\text{exp}}} \right] \times 100 \quad (6)$$

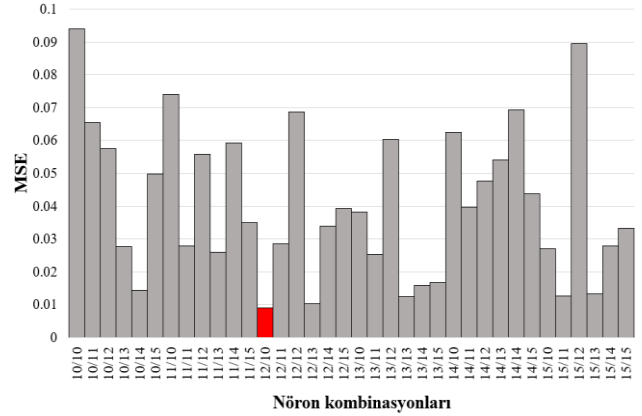
4 Bulgular ve tartışma

Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen elektriksel iletkenlikleri ve stabiliteleri ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Ayrıca bu özelliklerin tahmini için geliştirilen korelasyon sayıları da oldukça yetersizdir. Bu nedenle, bu çalışmada farklı kütle oranlarıdaki MgO/EG nanoakışkanların kütle oran ve sıcaklığa bağlı deneysel pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyel ölçümleri kullanılarak yüksek performanslı bir YSA modeli geliştirilmiştir. Daha sonra model verileri kullanılarak bu özelliklerin tahmini için farklı katsayılar sahip ortak bir korelasyon önerilmiştir.

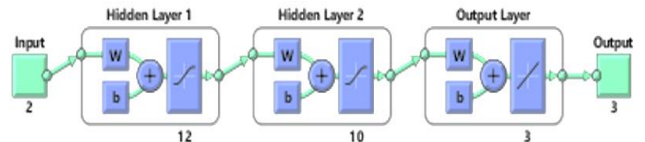
Çok katmanlı bir YSA modeli geliştirilirken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri gizli katmanlardaki nöron sayılarının optimize edilmesidir. Bu nedenle öncelikle çalışılan 2 gizli katmanda da 10 ile 15 nöron sayısı arasındaki tüm kombinasyonlar denenmiştir. En uygun nöron kombinasyonunun belirlenmesinde ağın MSE değeri dikkate alınmıştır. Şekil 2’de çalışılan tüm nöron kombinasyonlarına ait MSE değerleri verilmiştir. Şekil 2’de kırmızı sütun olarak gösterilen ve birinci gizli katmanda 12, ikinci gizli katmanda 10 nöron sayısına sahip en iyi performansı veren ağın MSE değeri 0.011118 olarak belirlenmiştir. Bu nöron kombinasyonlarına sahip ağın yapısı da Şekil 3’te sunulmuştur.

En uygun YSA modelinin belirlenmesinde dikkate alınan diğer bir parametre ise R^2 değeridir. Yukarıda bahsedilen en düşük MSE değerine sahip 12/10 nöron sayılarına sahip ağın R^2 değeri 0.99987 olarak elde edilmiştir. R^2 değerinin 1’e olan yakınlığı ve düşük MSE değerleri YSA modelleme çalışmalarında ağın performansının yüksek olduğuna işaret etmektedir. Bu çalışmada elde edilen MSE ve R^2 değerleri göz önüne alındığında ağın performansının yüksek olduğu

ortadadır. Fakat, diğer bir değerlendirme kriteri olan ve gerçek değerler ile modelin çıktı değerleri arasındaki yüzde hatayı veren MoD değerlerini de incelemek YSA çalışmalarında uygulanan genel bir yaklaşımdır. Şekil 4(a), (b) ve (c)’de sırasıyla pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyeli için toplam 55 farklı veri noktası için MoD değerleri verilmiştir. pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyeli için maksimum mutlak MoD değerleri sırasıyla %0.85, %3.52 ve %5.54 iken ortalama mutlak MoD değerleri ise yine sırasıyla %0.11, %0.78 ve %0.74 olarak belirlenmiştir. Özellikle ortalama mutlak MoD değerleri göz önüne alındığında mevcut ağın çıkış değerlerini başarılı bir şekilde tahmin yeteneği gösterdiği ortadadır.

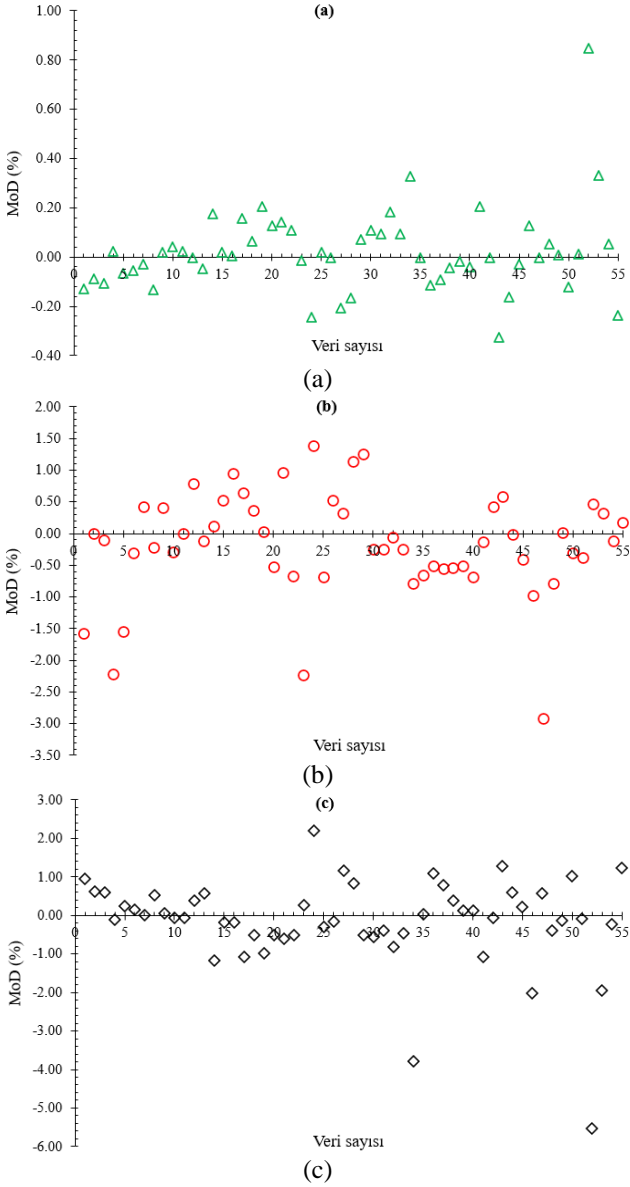


Şekil 2. Gizli katmandaki nöron sayısı kombinasyonlarına bağlı MSE değişimi



Şekil 3. En uygun ağ yapısı

Yapay sinir ağları, modelleme sonucu giriş ve çıkış parametreleri arasındaki ilişkiyi ortaya koyan bağıntılar ortaya koyabilmektedir. Fakat bu bağıntılar oldukça uzun ve karmaşık ifadelerden oluşmakta ve pratikte kullanımı neredeyse imkansız olmaktadır. Bu durum parametreler arasındaki bağıntıyı veren kullanışlı, basit korelasyonlar elde edebilmenin önemini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, yüksek tahmin becerisine sahip bir korelasyon ortaya koyabilmek için mevcut deneysel verilerin ara değerlerinin de düzgün bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, öncelikle Tablo 1’de verilen kütle oran ve sıcaklık verilerinin ara değerlerine karşılık gelen pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyeli verilerini tahmin edebilmek adına kütle oran değeri 0.1 artışla %0.1 ile %3 arasında sıcaklık ise 1°C artışla 20°C ile 70°C arasında artırılmıştır. Kütle oran için toplamda 5 olan veri sayısı 30’a, sıcaklık için ise toplamda 11 olan veri sayısı 51’e artırılmıştır. Bu iki toplam veri sayısının kombinasyonları sonucu toplamda 1530 farklı senaryo için çıkış verileri olan pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyelinin tahmin sonuçları geliştirilen ağdan istenmiştir.



Şekil 4. pH (a), elektriksel iletkenlik (b) ve zeta potansiyeli (c) için MoD değişimleri

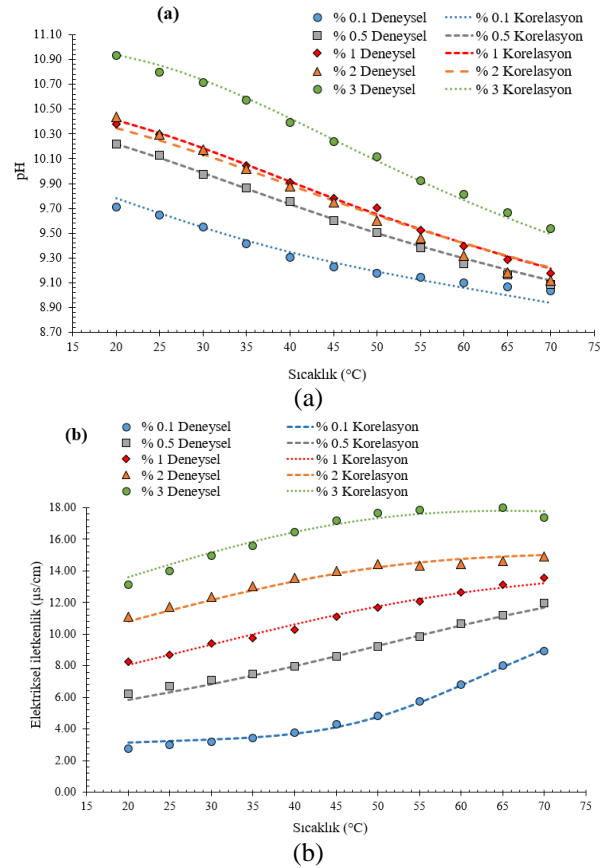
1530 farklı durum için çıkış verileri elde edildikten sonra eğri uydurma metodu ile hem pH hem elektriksel iletkenlik hem de zeta potansiyeli için geçerli, katsayıları birbirinden farklı fakat ortak bir korelasyon elde edilmiştir. Elde edilen korelasyon Denklem 7’de katsayılar ise Tablo 2’de sunulmuştur. Elde edilen denklemin pH için R² değeri 0.99232 iken, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyeli için sırasıyla 0.99722 ve 0.99579 olarak belirlenmiştir. Elde edilen korelasyonun deneysel veriler ile uyumu Şekil 5(a-c)’de verilmiştir. Şekil 5(a)’da pH’ın hem deneysel hem de korelasyon verilerinin farklı kütle oranlarında sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Deneysel ve korelasyon verileri oldukça uyumlu olmakla beraber max mutlak MoD ve ortalama mutlak MoD değerleri sırasıyla %1.41 ve %0.35 olarak belirlenmiştir. Şekil 5(b)’de ise elektriksel iletkenlik değerlerinin deneysel ve korelasyon sonuçları sunulmuştur. Elektriksel iletkenlik için max mutlak MoD ve ortalama

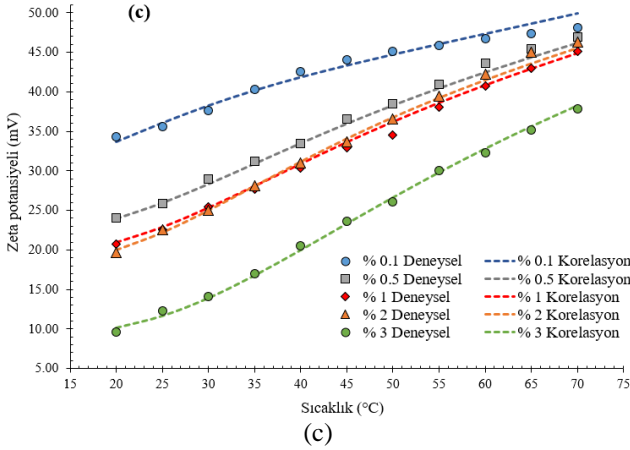
mutlak MoD değerleri sırasıyla %12.79 ve %2.08 olarak belirlenmiştir. Her ne kadar max sapma oranı yüksek olsa da ortalama sapma oranı oldukça düşüktür. Zeta potansiyel değerinin deneysel ve korelasyon uyumu ise Şekil 5(c)’de verilmiştir. Zeta potansiyelinin max mutlak MoD değeri %5.22 iken ortalama mutlak MoD değerleri %1.54’tür. Bu sapma oranları dikkate alındığında elde edilen korelasyonun %0.1-%3 kütle oran ve 20°C-70°C sıcaklık aralığındaki MgO/EG nanoakışkanların pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyel verilerini tahminde oldukça başarılı olduğu söylenebilir.

$$y = \frac{A_0 + A_1 * \phi + A_2 * T + A_3 * T^2 + B_0 * T^3}{1 + B_1 * \phi + B_2 * \phi^2 + B_3 * \phi^3 + C_0 * T + C_1 * T^2} \quad (7)$$

Tablo 2. pH, ısı iletkenlik ve zeta potansiyeli için sabitler

| pH | | | | |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| A ₀ | A ₁ | A ₂ | A ₃ | B ₀ |
| 10.12337 | 0.45643 | -0.27005 | 0.00516 | -6.92E-06 |
| B ₁ | B ₂ | B ₃ | C ₀ | C ₁ |
| -0.07226 | 0.08072 | -0.01736 | -0.02443 | 4.70E-04 |
| Elektriksel İletkenlik | | | | |
| A ₀ | A ₁ | A ₂ | A ₃ | B ₀ |
| 1.97865 | 5.3574 | -0.02489 | -0.00122 | 2.37E-05 |
| B ₁ | B ₂ | B ₃ | C ₀ | C ₁ |
| 0.24509 | 0.06295 | -0.02074 | -0.0293 | 2.75E-04 |
| Zeta Potansiyeli | | | | |
| A ₀ | A ₁ | A ₂ | A ₃ | B ₀ |
| 27.93936 | -3.04127 | -0.66068 | 0.01529 | 2.81E-04 |
| B ₁ | B ₂ | B ₃ | C ₀ | C ₁ |
| 0.98729 | -0.80036 | 0.18638 | -0.04027 | 9.77E-04 |





Şekil 5. pH (a), elektriksel iletkenlik (b) ve zeta potansiyeli (c) için deneysel ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırmaları

5 Sonuçlar

MgO/EG nanoakışkanların pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyel gibi önemli fiziksel özelliklerini inceleyen bu çalışma, deneysel verilerin YSA kullanılarak modellenmesi ve sıcaklık ile kütle oranına bağlı korelasyon elde edilmesi üzerine odaklanmıştır. Yapay sinir ağları, karmaşık veri setlerinden anlamlı ilişkiler çıkarma konusunda güçlü bir araç olarak kullanılmıştır. Literatürde nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini (ısı iletkenlik, viskozite, özgül ısı ve yoğunluk) sıcaklığa ve kütle oranına bağlı olarak tahmin eden birçok model bulunmaktadır. Bu çalışmada nanopartiküllerin temel akışkan içerisindeki homojen dağılımını ve nanoakışkanların uygulamada kullanım sürelerini belirleyen stabilite etkisi ve çoğu nanoakışkan çalışmalarında göz ardı edilen elektriksel iletkenlik etkisi öne çıkarılmıştır. Çalışma kapsamında %0.1-%3 kütle oran ve 20°C-70°C sıcaklık aralığındaki MgO/EG nanoakışkanların deneysel pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyel verileri yapay sinir ağları ile modellenmiştir. Model sonuçları kullanılarak bu üç özellik için de geçerli, katsayıları birbirinden farklı ortak bir korelasyon ortaya koyulmuştur. Elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- Çok katmanlı YSA modelinde 2 gizli katmanda 10 ile 15 nöron sayısı arasındaki tüm kombinasyonlar denenmiş ve en iyi sonucu ilk gizli katmanda 12, ikinci gizli katmanda 10 nöron sayısına sahip ağ vermiştir. Performansı en yüksek ağın MSE değeri 0.011118 iken R^2 değeri 0.99987 olarak belirlenmiştir.
- pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyeli için maksimum mutlak MoD değerleri sırasıyla %0.85, %3.52 ve %5.54 iken ortalama mutlak MoD değerleri ise yine sırasıyla %0.11, %0.78 ve %0.74 olarak belirlenmiştir.
- %0.1-%3 kütle oran ve 20°C-70°C sıcaklık aralığındaki MgO/EG nanoakışkanların pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyel verilerini tahmin etmek için bu üç özellik için de geçerli, katsayıları birbirinden farklı ortak bir korelasyon ortaya koyulmuştur.

- Elde edilen korelasyonun pH için R^2 değeri 0.99232 iken, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyeli için sırasıyla 0.99722 ve 0.99579 olarak belirlenmiştir.
- Yeni korelasyonun pH, elektriksel iletkenlik ve zeta potansiyeli için max mutlak MoD ve ortalama mutlak MoD değerleri sırasıyla %1.41-%0.35, %12.79-%2.08 ve %5.22-%1.54 olarak belirlenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] S.U. Choi and J.A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 1995.
- [2] T.-K. Hong, H.-S. Yang and C. Choi, Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids, Journal of Applied Physics, 97, 064311, 2005. <https://doi.org/10.1063/1.1861145>
- [3] M. Abareishi, E.K. Goharshadi, S.M. Zebarjad, H.K. Fadafan and A. Youssefi, Fabrication, characterization and measurement of thermal conductivity of Fe₃O₄ nanofluids. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 322, 3895-3901, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.08.016>
- [4] H. Zhu, C. Zhang, S. Liu, Y. Tang and Y. Yin, Effects of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of Fe₃O₄ aqueous nanofluids. Applied Physics Letters, 89, 023123, 2006. <https://doi.org/10.1063/1.2221905>
- [5] A. Karimi, S.S.S. Afghahi, H. Shariatmadar and M. Ashjaee, Experimental investigation on thermal conductivity of MFe₂O₄ (M= Fe and Co) magnetic nanofluids under influence of magnetic field. Thermochimica Acta, 598, 59-67, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.10.022>
- [6] L.S. Sundar, M.K. Singh and A.C. Sousa, Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids. International Communications in Heat and Mass Transfer, 52, 73-83, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.012>
- [7] Q. Li, Y. Xuan and J. Wang, Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. Experimental Thermal and Fluid Science, 30, 109-116, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2005.03.021>
- [8] L.S. Sundar, E.V. Ramana, M. Singh and A. De Sousa, Viscosity of low volume concentrations of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. Chemical physics letters, 554, 236-242, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2012.10.042>
- [9] M. Afrand, D. Toghraie and N. Sina, Experimental study on thermal conductivity of water-based Fe₃O₄ nanofluid: development of a new correlation and modeled by artificial neural network. International Communications in Heat and Mass Transfer, 75, 262-

- 269, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.04.023>
- [10] M.M. Papari, F. Yousefi, J. Moghadasi, H. Karimi and A. Campo, Modeling thermal conductivity augmentation of nanofluids using diffusion neural networks. *International journal of thermal sciences*, 50, 44-52, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.09.006>
- [11] M. Hojjat, S.G. Etemad, R. Bagheri and J. Thibault, Thermal conductivity of non-Newtonian nanofluids: experimental data and modeling using neural network. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 1017-1023, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.039>
- [12] A.Y. Bhat and A. Qayoum, Viscosity of CuO nanofluids: experimental investigation and modelling with FFBP-ANN. *Thermochimica Acta*, 714, 179267, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179267>
- [13] X. Yang, A. Boroomandpour, S. Wen, D. Toghraie and F. Soltani, Applying Artificial Neural Networks (ANNs) for prediction of the thermal characteristics of water/ethylene glycol-based mono, binary and ternary nanofluids containing MWCNTs, titania, and zinc oxide. *Powder Technology*, 388, 418-424, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.093>
- [14] F. Sahin and O. Genç, Experimentally determining the thermal properties of NiFe₂O₄ magnetic nanofluid under suitable stability conditions: Proposal the new correlation for thermophysical properties. *Powder Technology*, 427, 118706, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118706>
- [15] A. Ghadimi and I.H. Metselaar, The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51, 1-9, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.exptthermflusci.2013.06.001>
- [16] P.K. Das, N. Islam, A.K. Santra and R. Ganguly, Experimental investigation of thermophysical properties of Al₂O₃-water nanofluid: Role of surfactants. *Journal of Molecular Liquids* 237, 304-312, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.04.099>
- [17] G. Xia, H. Jiang, R. Liu and Y. Zhai, Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al₂O₃/de-ionized water nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 84, 118-124, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.05.004>
- [18] S. Umar, F. Sulaiman, N. Abdullah and S.N. Mohamad, Investigation of the effect of pH adjustment on the stability of nanofluid. *AIP conference proceedings: AIP Publishing*, 2018.
<https://doi.org/10.1063/1.5066987>
- [19] H. Zhang, S. Qing, Y. Zhai, X. Zhang and A. Zhang, The changes induced by pH in TiO₂/water nanofluids: Stability, thermophysical properties and thermal performance. *Powder technology*, 377, 748-759, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.09.004>
- [20] K. Cacia, F. Ordoñez, C. Zapata, B. Herrera, E. Pabón and R. Buitrago-Sierra, Surfactant concentration and pH effects on the zeta potential values of alumina nanofluids to inspect stability. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 583, 123960, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123960>
- [21] X. Wei and L. Wang, Synthesis and thermal conductivity of microfluidic copper nanofluids. *Particuology*, 8, 262-271, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.partic.2010.03.001>
- [22] X. Li, D. Zhu and X. Wang, Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions. *Journal of colloid and interface science*, 310, 456-463, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.02.067>
- [23] S.U. Ilyas, R. Pendyala and N. Marneni, Settling characteristics of alumina nanoparticles in ethanol-water mixtures. *Applied Mechanics and Materials*, 372, 143-148, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.372.143>
- [24] F. Sahin, O. Genç, M. Gökçek and A.B. Çolak, An experimental and new study on thermal conductivity and zeta potential of Fe₃O₄/water nanofluid: Machine learning modeling and proposing a new correlation. *Powder Technology*, 420, 118388, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118388>
- [25] K. Suganthi and K. Rajan, Temperature induced changes in ZnO-water nanofluid: zeta potential, size distribution and viscosity profiles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 7969-7980, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.08.032>
- [26] V. Singh, A. Kumar, M. Alam, A. Kumar, P. Kumar and V. Goyat, A study of morphology, UV measurements and zeta potential of zinc ferrite and Al₂O₃ nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 59, 1034-1039, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.371>
- [27] A.K. Singh and V.S. Raykar, Microwave synthesis of silver nanofluids with polyvinylpyrrolidone (PVP) and their transport properties. *Colloid and Polymer Science*, 286, 1667-1673, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00396-008-1932-9>
- [28] K. Lee, Y. Hwang, S. Cheong, L. Kwon, S. Kim and J. Lee, Performance evaluation of nano-lubricants of fullerene nanoparticles in refrigeration mineral oil. *Current Applied Physics*, 9, e128-e131, 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.cap.2008.12.054>
- [29] X.-j. Wang and D.-s. Zhu, Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids. *Chemical Physics Letters*, 470, 107-111, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2009.01.035>
- [30] N. Ali, J.A. Teixeira and A. Addali, A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties. *Journal of Nanomaterials*, 2018.
<https://doi.org/10.1155/2018/6978130>

- [31] P.I. Soares, C.A. Laia, A. Carvalho, L.C. Pereira, J.T. Coutinho, I.M. Ferreira, C.M. Novo and J.P. Borges, Iron oxide nanoparticles stabilized with a bilayer of oleic acid for magnetic hyperthermia and MRI applications. *Applied Surface Science*, 383, 240-247, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.181>
- [32] S. Ganguly, S. Sikdar and S. Basu, Experimental investigation of the effective electrical conductivity of aluminum oxide nanofluids. *Powder Technology*, 196, 326-330, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.08.010>
- [33] L.B. Modesto-Lopez and P. Biswas, Role of the effective electrical conductivity of nanosuspensions in the generation of TiO₂ agglomerates with electrospray. *Journal of Aerosol Science*, 41, 790-804, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2010.04.010>
- [34] I. Zakaria, W. Mohamed, W. Azmi, A. Mamat, R. Mamat and W. Daud, Thermo-electrical performance of PEM fuel cell using Al₂O₃ nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 119, 460-471, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.137>
- [35] I. Zakaria, W. Azmi, A. Mamat, R. Mamat, R. Saidur, S.A. Talib and W. Mohamed, Thermal analysis of Al₂O₃-water ethylene glycol mixture nanofluid for single PEM fuel cell cooling plate: an experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 5096-5112, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.041>
- [36] I. Zakaria, W. Mohamed, N. Azid, M. Suhaimi and W. Azmi, Heat transfer and electrical discharge of hybrid nanofluid coolants in a fuel cell cooling channel application. *Applied Thermal Engineering*, 210, 118369, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118369>
- [37] G.A. Longo, C. Zilio, E. Ceseracciu and M. Reggiani, Application of artificial neural network (ANN) for the prediction of thermal conductivity of oxide-water nanofluids. *Nano Energy*, 1, 290-296, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118369>
- [38] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, M. Bahiraei, D. Toghraie, O. Mahian and S. Wongwises, Thermal conductivity modeling of MgO/EG nanofluids using experimental data and artificial neural network. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 118, 287-294, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4002-1>
- [39] S.A. Adio, M. Sharifpur and J.P. Meyer, Factors affecting the pH and electrical conductivity of MgO-ethylene glycol nanofluids. *Bulletin of Materials Science*, 38, 1345-1357, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12034-015-1020-y>
- [40] G.L. Fan, A.S. El-Shafay, S.A. Eftekhari, M. Hekmatifar, D. Toghraie, A.S. Mohammed and A. Khan, A well-trained artificial neural network (ANN) using the trainlm algorithm for predicting the rheological behavior of water - Ethylene glycol/WO - MWCNTs nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 131, 105857, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105857>

